

**Konzeption und Entwicklung
eines Robot Cognition Processors
für adaptive Demontageanwendungen**

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Hendrik Poschmann, M. Eng.

aus

Braunschweig

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften

der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

22.07.2021

Dekan

Prof. Dr. mont. Leonhard Ganzer

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Prof. Dr.-Ing. Holger Brüggemann

Kurzfassung (Abstract)

Im Rahmen der perspektivischen Einführung einer Kreislaufwirtschaft sind ökonomische und ökologische Aspekte entscheidend für die Attraktivität der Umsetzung in beteiligten Wirtschaftsunternehmen. Die Demontage stellt innerhalb von Verwertungsprozessen in diesen Konzepten einen wichtigen Schritt dar, der aufgrund von hoher Varianten- und Zustandsvielfalt überwiegend manuell ausgeführt wird. Diese Forschungsarbeit untersucht die Möglichkeiten der nachhaltigen Verbesserung des Demontageprozesses durch selektive (Teil-)Automatisierung mit Hilfe eines Konzeptes aus dem Bereich der kognitiven Robotik. Es wird dabei auf Grundlage der Anforderungen aus realen Demontageprozessen ein System entwickelt, das in einer agentenbasierten Modulstruktur die Funktionsumfänge bietet, die für eine autonome, flexible Demontageplanung unter Berücksichtigung von Produkt- und Lebenszyklusdaten erforderlich sind und die effiziente Ausführung der Demontageoperationen im Rahmen einer Mensch-Roboter-Kollaboration erlauben. Grundlage für die entwickelten Module stellt ein standardisiertes Informationsmanagement-Konzept dar, welches die Anlagenebene der Demontage technisch mit allen beteiligten Stakeholdern der zirkulären Wertschöpfungskette verknüpft. Mit Hilfe von Industrie 4.0 Technologien, wie beispielsweise dem Einsatz von KI-unterstützten Entscheidungssystemen oder einer intelligenten Bilderkennungseinheit können so produktindividuelle Verwertungsszenarien innerhalb der Kreislaufwirtschaft bestimmt werden, welche die Schlüsselposition der Demontage am Beginn der zirkulären Wertschöpfungskette bestmöglich nutzen.

Die Untersuchungen des Systemkonzeptes am Beispiel der Moduldemontage von Elektrofahrzeug-Batterien zeigen, dass mit dem entwickelten Konzept eine Verbesserung gegenüber manueller Demontageoperationen erzielt werden kann. Die Verknüpfung der Systemeinheiten lässt sich durch die verwendeten Interoperabilitätsstandards skalieren und erlaubt so auch den industriellen Einsatz. Durch bidirektionale Kommunikationsstrukturen wird gezeigt, dass es möglich ist validierte Prozessinformationen aus einer Demontageeinheit an anderen Stellen zu nutzen. Dies reduziert den effektiven Aufwand im Umgang mit einer hohen Variantenvielfalt. Die Verwendung der entwickelten Modulkonzepte ist grundsätzlich auch in angrenzenden Feldern möglich, erfordert jedoch weitere Entwicklungs- und Abstimmungsarbeit.

Aus den Ergebnissen dieser Konzeptentwicklung folgen zahlreiche Weiterentwicklungs- und Anwendungspotenziale für Robotiksysteme im Bereich der kreislaufwirtschaftlichen Verwertungsprozesse. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit der Rückgewinnung kritischer Elemente und einer effizienten Ressourcennutzung durch höherwertige (Teil-)Nutzungs- und Verwertungsoptionen, ist der Einsatz hierauf aufbauender Konzepte eine lohnenswerte Zukunftsperspektive.

Danksagung

Zu großer Dankbarkeit fühle ich mich gegenüber Herrn Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann für die Übernahme der Betreuung dieser Dissertation am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal und für die stets hervorragende Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes Recycling 4.0 verpflichtet.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Brüggemann am Institut für Produktionstechnik der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, unter dessen Leitung ich in meinen drei Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt *Recycling 4.0* arbeiten durfte. Die vielen Freiräume bei der Vorgehensweise meiner Arbeit, aber auch die hilfreichen Rückmeldungen in zahlreichen Gesprächen haben die Forschungsergebnisse dieser Arbeit erst möglich gemacht.

Ich bedanke mich darüber hinaus bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Produktionstechnik für die wunderbare Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft. Besonderer Dank sei hier Herrn Jonas Arciuch, B. Eng. und Herrn Dipl.-Ing. Nanno Peters ausgesprochen. Natürlich bedanke ich mich auch bei den zahlreichen Studierenden, die mit Ihren Abschlussarbeiten wichtige Teilaspekte meiner Forschung unterstützt haben.

Das Projektteam der TU Clausthal, der TU Braunschweig und der Ostfalia aus dem Projekt Recycling 4.0 sei hier ebenfalls dankend erwähnt. Die fachlichen Diskussionen und Veröffentlichungen gemeinsam mit Herrn Lars Kintscher, M. Sc., Herrn Sebastian Lawrenz, M. Sc., Herrn Mathias Nippraschk, M. Sc. und Frau Priyanka Sharma, M. Sc. haben mein Interesse und Verständnis für neue Themengebiete geweckt und werden mir auch über das Projekt hinaus in guter Erinnerung bleiben.

Ebenfalls bedanke ich mich bei der Volkswagen AG für die Bereitstellung der Batterie im Rahmen des Forschungsprojektes und für die Freistellung zur Tätigkeit in diesem.

Publikationsliste

Im Rahmen der Forschungen zu dieser Dissertation war der Autor an folgenden Veröffentlichungen beteiligt:

Internationale Journals

Poschmann, H.; Brüggemann, H.; Goldmann, D. (2021): "Fostering End-of-Life Utilization by Information-driven Robotic Disassembly." In: *Procedia CIRP* 98, S. 282–287. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.104

Kintscher, L.; Lawrenz, S.; Poschmann, H. (2021): "A Life Cycle Oriented Data-Driven Architecture for an Advanced Circular Economy." In: *Procedia CIRP* 98, S. 318–323. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.110

Kintscher, L.; Lawrenz, S.; Poschmann, H.; Sharma, P.: "Recycling 4.0 – Digitalization as a Key for the Advanced Circular Economy". In: *Journal of Communications* 15(9):652-660, August 2020. DOI: 10.12720/jcm.15.9.652-660

Internationale Konferenzen

Blömeke S., Mennenga M., Herrmann C., Scheller C., Spengler T., Nippraschk M., Goldmann D., Lawrenz S., Sharma P., Rausch A., Poschmann H., Brüggemann H., Kintscher L., Bicker G. (2020): Recycling 4.0 - An Integrated Approach Towards an Advanced Circular Economy." In: *ICT4S'20: 7th International Conference on ICT for Sustainability*, June 21--26, 2020, Bristol, United Kingdom doi.org/10.1145/3401335.3401666

Poschmann, H.; Brüggemann, H.; Goldmann, D. (2020): Robot Cognition in Disassembly - Advanced Information Processing for an Adaptive Dismantling Ecosystem. In: *ADAPTIVE 2020, The Twelfth International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications*, October 25-29, Nice, France, IARIA, 2020. (Best Paper Award)

Nationale Journals

Poschmann, H.; Brüggemann, H.; Goldmann, D. (2020): Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation. In: *ChemieIngenieurTechnik*, Jg. 92, Ausgabe 4, April 2020, S. 341-359

Nationale Konferenzen

Poschmann, H., Brüggemann, H.; Goldmann, D. (2020): Robotergestützte Demontage als Treiber der Digitalisierung im Recycling der Zukunft. In: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann und Bernd Friedrich (Hg.): *Recycling und Sekundärrohstoffe*: TK-Verlag (13), S. 610-623, ISBN: 978-3-944310-51-0

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
2.1 Prolegomena (Begriffe und Abgrenzung)	4
2.2 Demontageprozess	9
2.3 Robotik in der Demontage.....	19
2.4 Robot Cognition: Machine Learning and Reasoning.....	31
3 Zwischenfazit: Perspektiven, Methodik, Forschungslücke	46
4 Konzeptentwicklung Robot Cognition Processor.....	52
4.1 Anforderungsmanagement und Problemstellungen	52
4.2 Prozessentwurf	59
4.3 Aufbau und Systemarchitektur	65
4.3.1 Der Robot Cognition Processor (Steuerung).....	67
4.3.2 Die System Perception Unit.....	89
4.3.3 Die Disassembly Execution Unit.....	104
4.4 Kommunikationskonzept.....	118
4.5 Prototypische Umsetzung	126
5 Evaluation und Validierung	141
5.1 Bestimmung der Evaluationsgrößen.....	141
5.2 Aufbau und Konzeptionierung des Experimentalszenarios	144
5.3 Auswertung	149
5.3.1 Qualitative Analyse	149
5.3.2 Quantitative Analyse.....	155
5.4 Fazit: Zielerreichung in Bezug auf die Anforderungen.....	165
6 Integrationspotenzial in reale Demontageumgebungen und angrenzende Industriebereiche	168
7 Weiterentwicklungspotenziale und aufbauende Fragestellungen	175
8 Zusammenfassung und Schlussfazit.....	180
9 Literatur	183

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
BMS	Battery Management System
CAD	Computer Aided Design
CE	Circular Economy
CNN	Convolutional Neural Network
COCO	Common Objects in Context
CPS	Cyberphysische Produktionssysteme
CSV	Comma Separated Values
CUDA	Compute Unified Device Architecture
CV	Computervision
CWA	Closed World Assumption
DEI	Disassembly-Effort-Index
DEP	Datenendpunkt
DEU	Disassembly Execution Unit
DIP	Datenintegrationspunkt
DL	Deep Learning
DNN	Deep Neural Network
DNS	Desoxyribonukleinsäure
DoE	Design of Experiments
DP	Disassembly Planning
DP	Dynamic Programming
DSP	Disassembly Sequence Planning
DT	Decision Tree
EA	Evolutionäre Algorithmen
eDIM	ease of Disassembly Metric
EFRE	Europäischer Fond für regionale Entwicklung
EoL	End-of-Life
FG	Forschungsgruppe
FN	False Negatives
FP	False Positives
GPU	Grafikprozessor
HMI	Human-Machine Interface
HMM	Hidden Markov Model
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDIS	International Dismantling Information System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMDS	International Material Data System
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Things
IPT	Institut für Produktionstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
LBR	Leichtbauroboter
LCA	Lifecycle-Assessment
M2M	Maschine zu Maschine

mAP	Mean Average Precision
MAS	Multi-Agenten System
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MCN	Kommunikationsnetzwerk
ML	Machine Learning
MLE	Maximum-Likelihood Methode
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MRI	Mensch-Roboter-Interaktion
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MTM	Methods Time Measurement
NFL	No-Free-Lunch Theorem
NMS	Non-max Supression
NN	Neuronales Netz
NODE	Neural oblivious Decision Ensemble
NP	Nichtdeterministische Polynomialzeit
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PCA	Principal Component Analysis
PEAS	Performance Measure, Environment, Actuators, Sensors
PHP	Hypertext Preprocessor
PLM	Product-Lifecycle Management
QoS	Quality of Service
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
RCP	Robot Cognition Processor
ReLU	Rectified Linear Unit
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio-Frequency IDentification
RoI	Region of Interest
ROS	Robot Operating System
RoViDiAsS	Robotic Visual Disassembly and Assembly System
RPC	Remote Procedure Call
RPN	Region Proposal Network
RRT	Rapid-Random Tree
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SDG	Sustainable Development Goal
SDK	Software Developer Kit
SGD	Stochastic gradient Descent
SLD	Selective Linear Definite
SLR	Systematische Literaturrecherche
SoH	State-of-Health
SPU	System Perception Unit
SSD	Single Shot Detector
SVM	Support Vector Machine
TCP	Tool Center Point
TCP-IP	Transmission Control Protocol - Internet Protocol
TMU	Time Measurement Units

TP	True Positives
UML	Universal Markup Language
VIN	Vehicle Identification Number
VR	Virtual Reality
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment
XML	Extensible Markup Language
ZSB	Zusammenbau

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Konzept der Kreislaufwirtschaft aus [2]	1
Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit und Bezugsrahmen der Vorgehensweise	3
Abbildung 2.1: Begriffsrahmen der Kreislaufwirtschaft im Kontext der Arbeit nach [11]	4
Abbildung 2.2: Unterschiedliche Arten der Mensch-Roboter-Interaktion nach [19].....	6
Abbildung 2.3: Informationswissenschaftliche Verständnishierarchie nach [26].....	7
Abbildung 2.4: Prozessframework der Advanced Circular Economy nach dem Recycling 4.0 Ansatz [32]	8
Abbildung 2.5: Einordnung des Recyclings und der Demontage in den Produktlebenszyklus	9
Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines allgemeinen Demontageprozesses [35]	10
Abbildung 2.7: Arten der Demontage und deren Auswirkung auf den Gesamtprozess.....	11
Abbildung 2.8: Problemfelder der Demontage nach Kategorien nach [35]	12
Abbildung 2.9: Verbindungsdiagramm (A) mit i) ZSB-Darstellung, ii) erweiterte Form, iii) reduzierte Form mit quasi-Bauteilen und iv) minimale Form sowie Demontagematrix (B) nach [50]	17
Abbildung 2.10: Vorranggraphen und abgeleitete Zustandsgraphen nach [39]	18
Abbildung 2.11: Weltweite Installation von Industrierobotern pro Jahr von 2014 bis 2019 [60].....	19
Abbildung 2.12: (A) Automatisierter Fertigungsprozess, (B) Automatisierungspyramide nach [68] ..	21
Abbildung 2.13: Allgemeiner Systemaufbau für die Demontageautomatisierung nach [50].....	22
Abbildung 2.14: Erweitertes Framework der wichtigsten Forschungsgruppen (FG) zur Robotik in der Demontage	23
Abbildung 2.15: Systemarchitektur und konzeptioneller Aufbau der Demontageanlage aus Vongbunyong et al. [75].....	24
Abbildung 2.16: Systemarchitektur und Foto der kooperativen Demontageanlage aus [80] und [81] .	25
Abbildung 2.17: Vollautomatisierter Aufbau einer PC-Demontage (A) [87] und MRK-Ausbaustufe (B) [88]	26
Abbildung 2.18: Anlage der FG Seliger (A) [99] und der FG Kopacek (B) [66]	27
Abbildung 2.19: Smartphone-Demontageroboter "Liam" (A) [108] und MRK-Batteriedemontage (B) [110]	28
Abbildung 2.20: Systemarchitektur RoViDiAsS (A) [113] und Demontageanlage nach Li et al. (B) [114]	28
Abbildung 2.21: Stufen des intelligenten Verhaltens von Maschinensystemen nach [119]	31
Abbildung 2.22: Einordnung der kognitiven Robotik als Schnittmenge zwischen Robotik und KI.....	33
Abbildung 2.23: Semiotisches Tetraeder der Ontologie nach [131] und Systemelemente der Recycling 4.0 Domäne	37
Abbildung 2.24: Allgemeiner Aufbau eines intelligenten Demontagesystems nach Aufgabenbereichen [138]	39
Abbildung 2.25: Aufbau von Agentensystemen: (A) allgemeiner Agent; (B) modell- und zielbasierter Agent; nach [139].....	39
Abbildung 2.26: Bildverarbeitungsprozess und Verarbeitungskette nach [146].....	41
Abbildung 2.27: Kognitive Robotik als Anwendungsfall der Entscheidungstheorie (vgl. [156])	42
Abbildung 3.1: Heuristische Vorgehensweise zur Zielerreichung des Forschungsvorhabens.....	47
Abbildung 3.2: Forschungsperspektiven aus dem Stand der Wissenschaft und Technik der Teilgebiete	48
Abbildung 4.1: Ablauforientiertes Vorgehen der Konzeptentwicklung.....	52
Abbildung 4.2: Prozess Anforderungsmanagement nach ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [184]	53

Abbildung 4.3: Grundlegender Prozess der selektiven, hybriden Demontage mit Robotern.....	59
Abbildung 4.4: Informationsfluss im Demontageprozess	61
Abbildung 4.5 Prozessmodell der hybriden selektiven Demontage mit Hilfe kognitiver Robotik	63
Abbildung 4.6: Funktionsspezifikationen der Systemagenten im Kontext des Gesamtsystems	65
Abbildung 4.7: Funktionsmodell des RCP Prozesses	68
Abbildung 4.8: Beispielhafte Produktstruktur mit Hierarchieebenen und allokierten Datensätzen nach [194]	69
Abbildung 4.9: Ökonomisches Modell einer optimalen Demontagestrategie für das Recycling [47]..	74
Abbildung 4.10: Entscheidungsoptionen des RCP im Demontageprozess	75
Abbildung 4.11: Ausgewählte Ergebnisse des Benchmarks von Entscheidungsmethoden	77
Abbildung 4.12: Schematischer Lernprozess des RCP	81
Abbildung 4.13: Bourjault-Stift mit Demontage-AND/OR-Graphen in der Notation nach Lambert [229] und Guo et al. [209].....	83
Abbildung 4.14: Exemplarische Vorrangmatrix S und Demontagematrix D für den Bourjault-Stift...	84
Abbildung 4.15: Typische CNN Architektur [237].....	91
Abbildung 4.16: Genauigkeit zu Rechenaufwand für verschiedene Netzarchitekturen (links) und Modelle (rechts) [240].....	92
Abbildung 4.17: Funktionsprinzip und Architektur des Faster R-CNN nach [243].....	93
Abbildung 4.18: Struktur Faster R-CNN Inception ResNet V2 für die Identifikationsfunktion im SPU nach [247].....	94
Abbildung 4.20: Koordinatensysteme des Demontagesystems in Relation zur SPU.....	96
Abbildung 4.21: Kategorien der optischen Bauteilbewertung im Rahmen der SPU-Analyse	97
Abbildung 4.22: Ablauf der optischen Bauteilbewertung in der SPU.....	100
Abbildung 4.23: Zusätzliche Keypoint-Label für die verbesserte Erkennung von Händen im Arbeitsbereich (Beispiel).....	102
Abbildung 4.24: Exemplarischer Prozessablauf der Operationsplanung in der DEU	106
Abbildung 4.25: Ablaufroutine der Ausführungsplanung für das Robotersystem	107
Abbildung 4.26: Zustände und Aktionen für das Operationsbeispiel der DEU	108
Abbildung 4.27: (A) Exemplarischer Arbeitsraum, (B) Voxel-Netz Arbeitsraum: Oben die Voxel des Schraubwerkzeugs.....	111
Abbildung 4.28: Konzeptframework Human-Machine-Interface	115
Abbildung 4.29: Beispielhafte Interaktionsfolge im HMI für einen Demontageprozess.....	116
Abbildung 4.30: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 [291]	118
Abbildung 4.31: Kommunikationsmatrix für System- und Nebenprozesse.....	119
Abbildung 4.32: Hybride Kommunikationsarchitektur des Demontagesystems	121
Abbildung 4.33: OPC UA Architektur des Informationsmodells nach [302]	122
Abbildung 4.34: Beispielhafte OPC UA Objektstruktur des konzipierten Informationsmodells.....	123
Abbildung 4.35: UML-Sequenzdiagramm der Systemkommunikation für einen beispielhaften Demontageablauf [305].....	125
Abbildung 4.36: Schematische Traktionsbatterie VW e-up! (MJ 2014) [309]	127
Abbildung 4.37: Konzeptdemonstrator als Prototyp	130
Abbildung 4.38: Umsetzungsbeispiele OPC-Informationsstruktur im Prototypen	131
Abbildung 4.39: AND/OR-Graph (gekürzt) mit Vorrangrelationen für die Moduldemontage	134
Abbildung 4.40: Funktionsimplementierung der SPU am Prototypen, jeweils mit Beispiel-RoI.....	135
Abbildung 4.41: Ablaufbeschreibung Beispieloperation Moduldemontage	137

Abbildung 4.42: Simulation der Zugänglichkeit der äußeren Konturen der Batterie mit verfahrbarer Traverse.....	138
Abbildung 4.43: Screenshot aus der Webapplikation des Prototypen-HMI.....	140
Abbildung 5.1: Klassifizierung der Experimentalszenarien und die betreffenden Module	145
Abbildung 5.2: Auswertung der Systemkommunikation und Informationsübermittlung	149
Abbildung 5.3: Plot der Korrelationsanalyse für die Features der Testdaten.....	152
Abbildung 5.4: Auswertung Trainingsverhalten SPU Objekterkennung	154
Abbildung 5.5: Klassifizierungsgenauigkeit (true positives) für unbekannte Testdaten mit gleitendem Durchschnitt	155
Abbildung 5.6: Konfusionsmatrizen der Versuchsblocke zu je 32 Samples.....	156
Abbildung 5.7: Haupteffekte (dimensionslos) aus Plackett-Burman L32 Versuch	157
Abbildung 5.8: Auswertung der Anzahl und Genauigkeit von 50 Testframes mit je 40 Schrauben für das SPU-Modul.....	158
Abbildung 5.9: Auswertung der Positions- und Detektionsgenauigkeit der 40 Modulverschraubungen im Experiment	159
Abbildung 5.10: Auswertung der Demontageversuche (rote Säule entspricht einem Fehlschlag)	162
Abbildung 5.11: Auswertung der MRK Sicherheitseinrichtung	164
Abbildung 6.1: Circular-Economy Konzept für Traktionsbatterien aus [208].....	172

Bei allen Abbildungen ohne explizite Angabe von Quellen handelt es sich um eigene Darstellungen.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Informationsmanagement entlang des Demontageprozesses nach [38]	12
Tabelle 2.2: Übersicht zu den wichtigsten ML-Techniken nach [124]	34
Tabelle 2.3: Funktionsimplementierung eines Agenten als Programm im Pseudocode nach [139]	40
Tabelle 3.1: Wissenschaftstheoretisch-kritische Überprüfung der Hypothesen.....	51
Tabelle 4.1: Stakeholder der Demontage und Anforderungen auf Basis der Szenarienanalyse.....	55
Tabelle 4.2: Funktionen des automatisierten Demontageprozesses im Anwendungskontext	55
Tabelle 4.3: Output-Charakteristik und Messgrößen für die Systemfunktionen.....	57
Tabelle 4.4: PEAS-Beschreibung des RCP	68
Tabelle 4.5: Allokierete Informationen pro Element des Datenmodells.....	71
Tabelle 4.6: Aufbau des NN des RCP-Entscheidungsmoduls.....	78
Tabelle 4.7: Algorithmus der Sequenzplanungs-Funktion des RCP im Pseudocode.....	86
Tabelle 4.8: Algorithmus des StateTransitionManagers im Pseudocode	87
Tabelle 4.9: PEAS-Beschreibung der SPU	89
Tabelle 4.10: Merkmale und Verfahren zur optischen Bauteilbewertung [146, 235, 256]	98
Tabelle 4.11: PEAS-Beschreibung der DEU.....	104
Tabelle 4.12: Funktionsübersicht zum Robotersystem-Modul der DEU	105
Tabelle 4.13: Algorithmische Darstellung der Werkzeugauswahl im Pseudocode.....	113
Tabelle 4.14: Vergleich der Frameworks OPC UA, MQTT und ROS aus [295].....	120
Tabelle 4.15: Operationsplan für die exemplarische Demontage der Komponente "Batteriemodul".	127
Tabelle 4.16: Generische Beispielbatterien als Prototyp im Informationsmodell.....	132
Tabelle 4.17: Kenngrößen zur Bestimmung des Sicherheitsabstandes nach DIN ISO/TS 15066	139
Tabelle 5.1: Evaluationsgrößen in Bezug auf Hypothese 1.....	142
Tabelle 5.2: Evaluationsgrößen in Bezug auf Hypothese 2 und 2.1.....	142
Tabelle 5.3: Evaluationsgrößen in Bezug auf Hypothese 3.....	143
Tabelle 5.4: Zuordnung der Features im Datensatz bezüglich der Nachhaltigkeitskategorien	151
Tabelle 5.5: Signifikante Features des Klassifizierungsergebnisses (Reihenfolge absteigend)	153
Tabelle 5.6: Vorbestimmte Zeiten nach MTM-Planung für die manuelle Demontageoperation.....	160
Tabelle 5.7: Wirtschaftliche Auswertung der 320 Testsamples für die Szenarien (Werte in €)	163
Tabelle 5.8: Zielerreichung in Bezug auf die Primärfragestellungen.....	165
Tabelle 6.1: Integrationsanforderungen nach Modulen.....	168

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Der Klimawandel, die inhomogene geographische Verteilung von Rohstoffen und die Verlagerung von Wirtschaftsleistung verändern die gesamtgesellschaftliche Bedeutung von Recyclingprozessen von einer bislang oft nachrangig behandelten Phase im Produktlebenszyklus hin zu einer strategisch bedeutsamen Zielgröße für Gesellschaft und Unternehmen. In den *Sustainable Development Goals* (SDGs), den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen, werden nachhaltige Konsum- und Produktionsstrategien als wichtige Säule zur Erreichung der weltweiten Klimaziele genannt [1]. Um diese zu erreichen ist die Rückgewinnung kritischer Elemente und eine effiziente Ressourcennutzung im Rahmen einer *Kreislaufwirtschaft* (siehe Abbildung 1.1) unumgänglich.

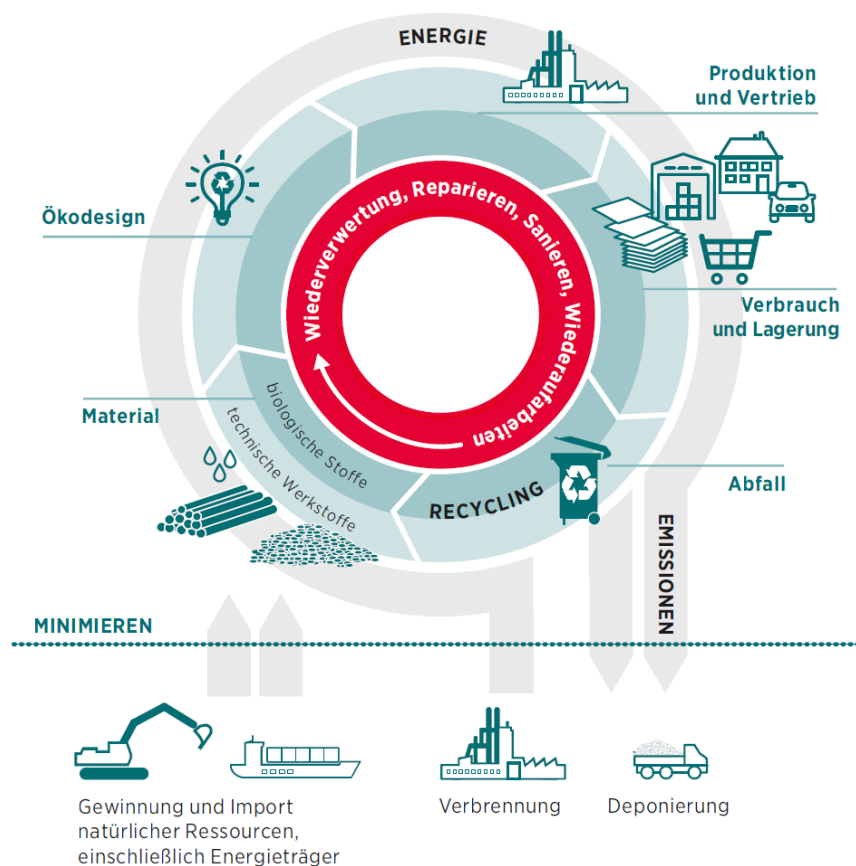


Abbildung 1.1: Konzept der Kreislaufwirtschaft aus [2]

Die Digitalisierungspotenziale von Wertschöpfungssystemen steigen über alle Branchen stetig an. Verantwortlich dafür ist der als *Industrie 4.0* vielfach beschriebene Paradigmenwechsel hin zu einer cyberphysischen Systemlandschaft mit umfassender Informationsintegration [3]. Durch günstiger werdende Sensoren und die Verbreitung von lizenzfreien Softwarebibliotheken wird dieses *Internet of Things* (IoT) neben dem Produktionsbereich [4] auch im Remanufacturing [5] immer häufiger Gegenstand aktueller Einsatzszenarien und von Technologiekonzepten. Grundlage für einzelteilbezogene Verwertungsprozesse ist nach einer Sammlung und Sortierung die Vorbehandlung und Demontage [6]. Hierbei sind es vor allem die zahlreichen Produktvarianten und Produktzustände bei sehr kleinen Losgrößen, die den Einsatz moderner Automatisierungstechnologien für eine Rationalisierung der oft kostspieligen Prozesse erschweren. Eine effektive und effiziente Gestaltung solcher Systeme unter Zuhilfe-

nahme moderner Technologiekonzepte aus dem Bereich der kognitiven Robotik erfordert eine umfangreiche Integration der Informationsflüsse zu Produkt und Prozess, idealerweise über den gesamten Produktlebenszyklus. Auf Grundlage dieser Informationen können daraufhin autonome Entscheidungsszenarien bezüglich der möglichen Verwertungsoptionen getroffen werden.

Das Konzept einer *optimalen* Entscheidung ist dabei in realen Systemen kaum implementierbar, da die erforderlichen Simplifizierungen geeigneter Modelle zur Darstellung der Systeme oft unzureichend sind, im Hinblick auf die Fähigkeit komplexe Prozesse mit zahlreichen Faktoren zu berücksichtigen, ohne durch modellspezifische Invarianzen signifikante Abweichungen zur Realität hervorzurufen. *Herbert Simon*, der Nobelpreisträger für Wirtschaftswissenschaften 1978, prägte daher den Begriff *satisfice* (Engl. Kompositum aus *satisfy* und *suffice*), der besagt, dass in den meisten Anwendungsfällen eine realistische und effizient zu findende Entscheidung komplexen Optimierungsmodellen vorzuziehen sei [7]. Ziel dieser Arbeit ist daher die nachhaltige Verbesserung von Verwertungsprozessen durch eine roboterbasierte Demontageeinrichtung, die in der Lage ist selbständig im Rahmen eines Informations-Frameworks zu agieren und so zu einer Steigerung der wirtschaftlichen Attraktivität und Rentabilität von Demontageprozessen für einen weiteren Schritt in Richtung einer Kreislaufwirtschaft beizutragen. Im Rahmen der Untersuchungen wird eine Methodik entwickelt, die den Einsatz informationstechnisch verknüpfter Robotersysteme mit hohem Autonomiegrad in zahlreichen Anwendungsfällen ermöglicht. Ein Hauptaspekt ist dabei das Informationsmanagement und die einzigartige Perspektive der Demontage als dem Prozessschritt mit der erstmaligen physischen Verfügbarkeit der Bauteile im Verwertungsprozess. Die Validierung der Forschungsergebnisse dieser aus dem EFRE-Innovationsverbund *Recycling 4.0* hervorgegangenen Arbeit erfolgt am Beispiel einer Elektro-Traktionsbatterie als komplexem Bauteil mit hohen Wertanteilen in Bezug auf die Weiterverwendung und Aufbereitung von Komponenten, als auch hohen Materialwertanteilen auf Grund von signifikanten Anteilen seltener Werkstoffe. Als interdisziplinärer Beitrag zwischen den Fachgebieten der Robotik und der Recyclingtechnik versteht sich diese Dissertationsschrift auch als Brücke zwischen den oft abstrakten und anwendungsfernen theoretischen Arbeiten zu spezifischen Arbeitsfeldern der kognitiven Robotik und dem praktischen Anwendungshorizont einer wachsenden und technologieoffenen Recyclingindustrie.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit (siehe Abbildung 1.2) orientiert sich im Wesentlichen an der praktischen Vorgehensweise zur Konzeption und Entwicklung des *Robot-Cognition-Processors*. Nach einer Vorbemerkung, in der die wichtigsten Fachbegriffe für das Verständnis der Arbeit definiert und von nicht relevanten Teilgebieten abgegrenzt werden, erfolgt die Einführung in die Thematik durch eine umfassende Darstellung des Standes der Wissenschaft und der Technik. Hierfür wird der Demontageprozess eingehend analysiert und hinsichtlich der Informationsschnittstellen beschrieben. Darüber hinaus wird eine Übersicht zu den bisher entwickelten, automatisierten Demontagesystemen mit Robotereinsatz gegeben. Hier werden die wichtigsten Arbeiten näher vorgestellt und hinsichtlich ihres Beitrags zu der vorliegenden Forschungsarbeit erläutert. Eine Einführung in das Feld der Robot Cognition unter Berücksichtigung der wichtigsten, zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz beschließt das zweite Kapitel. Auf Grundlage der erfolgten Einordnung kann in einem ersten Zwischenfazit der Forschungsanspruch der Arbeit nach Maßgabe eines Beitrags zur Optimierung der Demontageprozesse durch eine roboterbasierte Automatisierungslösung formuliert und begründet werden. Hervorgehend aus der formulierten Fragestellung und den entwickelten Hypothesen erfolgt die Konzeptentwicklung. Hierfür wird ein umfassendes Anforderungsmanagement aufgestellt und ein optimierter Prozessablauf entworfen, auf Basis dessen die eigentliche Systemarchitektur mit den unterschiedlichen Modulen entwickelt wird. Es handelt sich dabei um die Entwicklung einer methodischen

Vorgehensweise, nicht einer konkreten Anwendung, da der Ansatz des Robot Cognition Processors allgemein übertragbar ist. Die entwickelte Methodik wird prototypisch in einem Demontagesystem am Beispiel der Moduldemontage einer Lithium-Ionen-Traktionsbatterie umgesetzt. Auf Basis dieser prototypischen Implementierung erfolgt im nächsten Hauptkapitel die Evaluation und Validierung des beschriebenen Konzeptes. Hierzu werden eingangs die Evaluationsgrößen bestimmt und das Experimentalszenario definiert. In einer qualitativen und quantitativen Analyse werden die einzelnen Bestandteile der Systemarchitektur sowie die Umsetzung des Experimentalszenarios validiert. Ein Zwischenfazit in Bezug auf die Zielerreichung gemessen an den Systemanforderungen schließt dieses Hauptkapitel ab. Das Integrationspotenzial des Robot Cognition Processors in reale Demontageumgebungen und angrenzende Industriebereiche wird anhand von einer exemplarischen Demontageanwendung betrachtet und Weiterentwicklungspotenziale sowie aufbauende Fragestellungen werden formuliert. Eine Zusammenfassung des Forschungsvorhabens und ein Schlussfazit aus Sicht des Autors beenden die Arbeit.

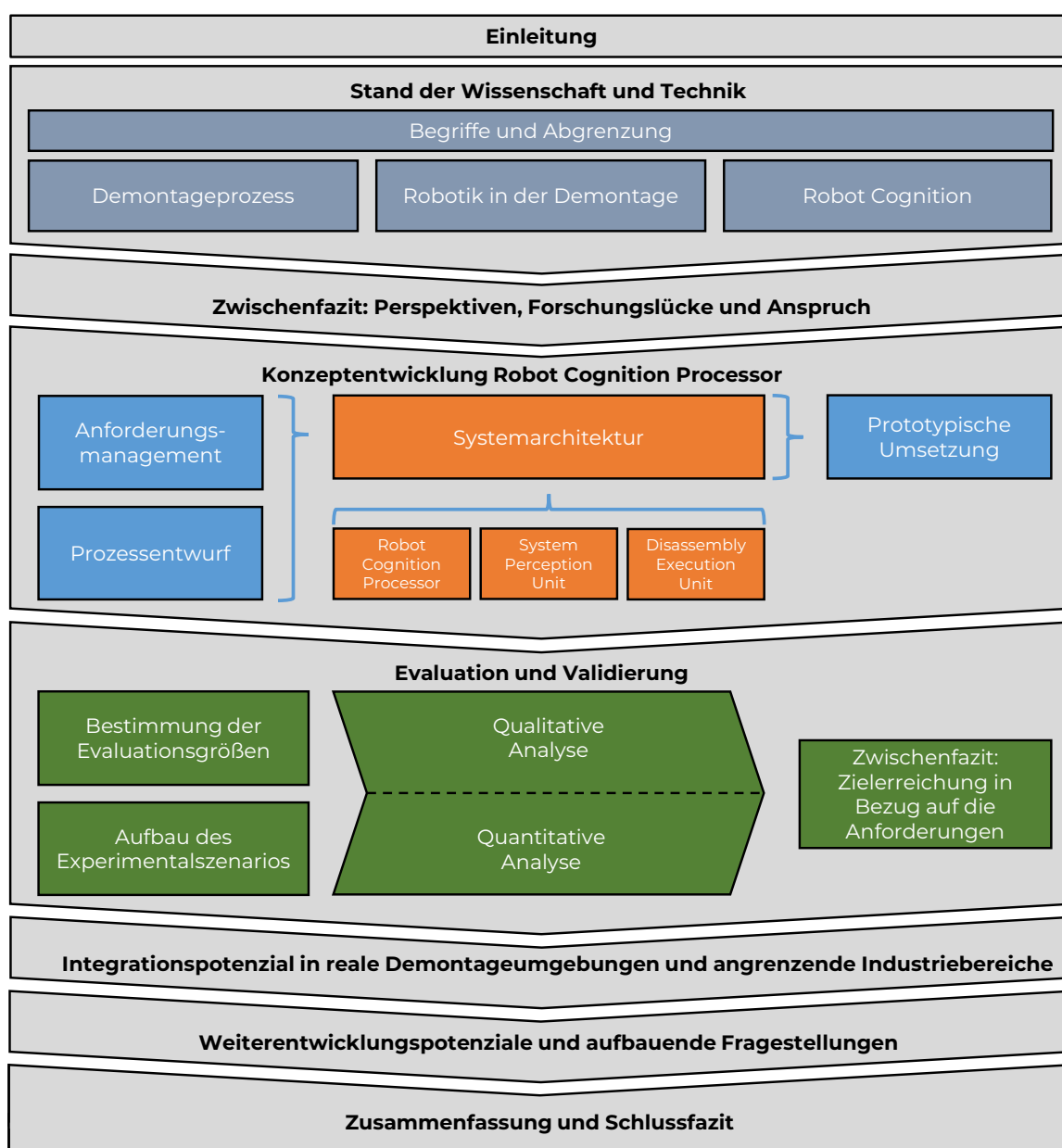


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit und Bezugsrahmen der Vorgehensweise

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Im folgenden Kapitel wird nach einer vorausgehenden Begriffsklärung und Abgrenzung der Arbeit gegenüber angrenzenden Forschungsbereichen ein Überblick zu den wissenschaftlichen und technischen Ständen der betrachteten Hauptdisziplinen gegeben. Nach einer Darlegung des betrachteten Demontageprozesses und einer Einordnung in den Kontext der End-of-Life-Verwertungsoptionen (EoL) wird eine Übersicht zu bisherigen Forschungs- und Industrieprojekten im Bereich Robotik in der Demontage vorgestellt. Das Forschungsfeld der Robot-Cognition wird als Schlüsseldisziplin erläutert und die für die Arbeit wichtigsten Teilbereiche aus dem Machine-Learning näher betrachtet.

2.1 Prolegomena (Begriffe und Abgrenzung)

In diesem Unterkapitel sollen die wichtigsten Begriffe in dieser Arbeit definiert und gegenüber anderen Forschungsfeldern abgegrenzt werden. Eine derartige Vorgehensweise ist erforderlich, da vor allem bei interdisziplinären Forschungsvorhaben häufig unterschiedliche Definitionen und Verständnisweisen einzelner Begriffe auftreten können. Die hier eingegrenzten Interpretationsweisen orientieren sich dabei an gängigen Quellen wie Normen oder Standardwerken. Die Nutzung der Begriffe in der fortschreitenden Arbeit findet gemäß den hier getroffenen Abgrenzungen statt.

Das Recycling beschreibt als solches bereits eine *hybride Wissenschaft*. Hervorgehend aus der Abfallwirtschaft und den Primärrohstofftechnologien [6] ist Recycling ein von Erlös und Werterhalt sowie Ressourcen- und Umweltschonung getriebenes Vorhaben, dass „[...] jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden“ [8] einschließt. Der Ansatz einer nachhaltigen, ressourceneffizienten und umweltgerechten Kreislaufwirtschaft, synonym zum englischen Begriff *Circular Economy* verwendet, bezeichnet ein mehrstufiges Redistributionssystem möglichst geschlossener Lieferketten [9]. Auf Grundlage der Untersuchungen von *Gisellini et al.* [10] sowie einer Analyse von über 114 unterschiedlichen Definitionen des Circular-Economy-Konzeptes [11] wird im Rahmen dieser Arbeit das in Abbildung 2.1 dargestellte Framework verwendet und auf die folgenden Begrifflichkeiten der Verwertungshierarchie eingegrenzt.

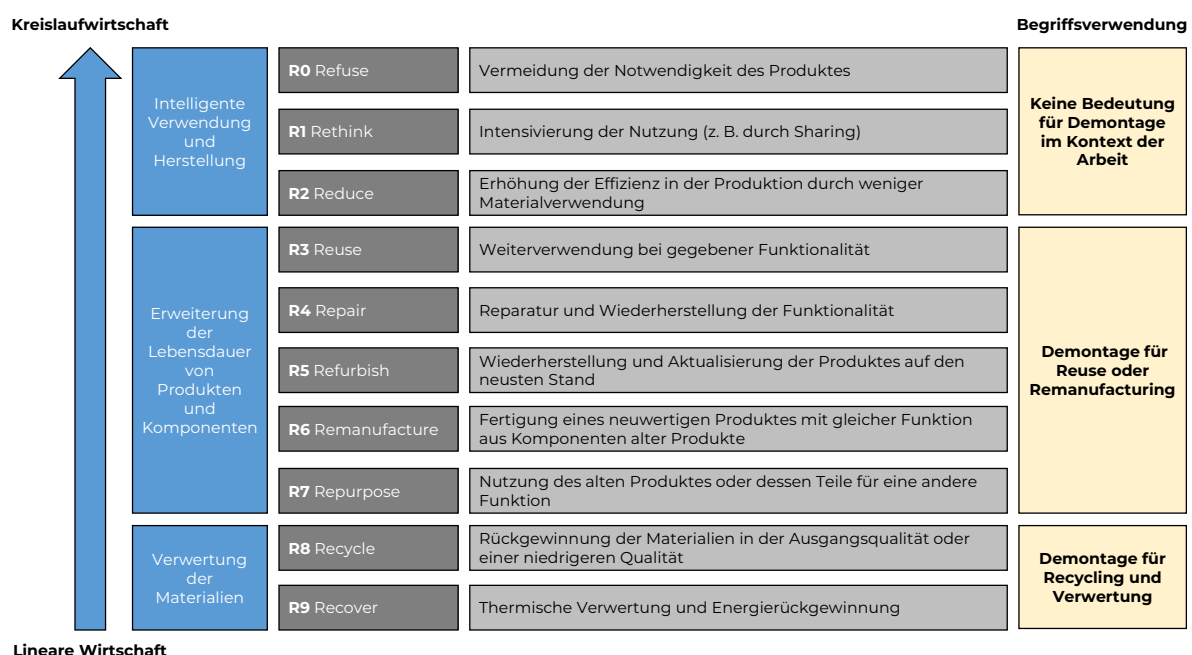


Abbildung 2.1: Begriffsrahmen der Kreislaufwirtschaft im Kontext der Arbeit nach [11]

Auf der obersten Ebene der Kreislaufwirtschafts-Hierarchie befinden sich mit *Refuse*, *Rethink* und *Reduce* drei Stufen, die sich auf die Herstellung und Handhabung von Produkten im Kontext der Erfüllung einer spezifischen Funktionalität befassen. In dieser Arbeit werden diese Optionen nicht näher betrachtet. Die Erweiterung der Lebensdauer von Produkten und Komponenten umfasst die Wiederverwendung (*Reuse*) bis hin zur funktionellen Umwidmung (*Repurpose*). In Bezug auf die Demontage sind diese Szenarien wichtig, da die Erhaltung der funktionellen Integrität von Baugruppen oder Komponenten ein vorrangiges Ziel der Verwertung darstellt. Im Lauf der Arbeit werden diese Verwertungsoptionen unter der Bezeichnung *Demontage für Reuse oder Remanufacturing* zusammengefasst, da eine Weiterverwendung (sog. *Second-Life-Applikation*) oder eine Aufarbeitung unter Beibehaltung der Funktionalität der Komponenten in den meisten Fällen den primären Grund für die Demontage darstellen. Die Verwertung der Materialien, also nach dem Begriffsrahmen das eigentliche *Recycling*, stellt ebenfalls eine Zielverwertungsoption für die Demontage dar. Hierbei kann die Demontage aufgrund des damit verbundenen Aufwands nur für eine direkte Rückgewinnung seltener und wertvoller Materialien begründet werden. Eine thermische Verwertung im Sinne von *Recover* stellt lediglich eine Option für Verbindungselemente und Restprodukte dar.

Als Recyclingprozess wird in dieser Arbeit der gesamte Ablauf der Verwertungskette von der Sammlung und Vorsortierung über Vorbehandlung und Demontage bis hin zur mechanischen und chemischen Aufbereitung sowie der daraus folgenden Herstellung von Werkstoffen und Grundstoffen analog [6] betrachtet. Die Demontage ist dabei der Prozessschritt auf dem das Hauptaugenmerk liegt. Angrenzende Prozessschritte werden gerade im Hinblick auf Informationsquellen und –senken erwähnt, der eigentliche Forschungsgegenstand der Arbeit beschränkt sich allerdings vollständig auf das Feld der Demontage.

Unter Demontage wird die „[...] Gesamtheit aller geplanten Vorgänge, die der Vereinzelung von Mehrkörpersystemen zu Baugruppen, Bauteilen und/oder formlosem Stoff dienen“ [12] verstanden. Der Demontageprozess ist folglich die geplante Verkettung von Arbeitsfolgen zur Durchführung der Demontage in einem organisierten System. Alle in dieser Arbeit untersuchten Demontageprozesse sind von verfahrenstechnischen Vorgehensweisen wie z. B. Fragmentierung abzugrenzen und beziehen sich ausdrücklich auf EoL-Produkte, nicht auf Produkt- bzw. Materialströme (Einzelteilbetrachtung). Unter dem Begriff der *hybriden Demontage* wird eine teilautomatisierte Prozessgestaltung mit maschinellen und menschlichen Entscheidungsbereichen verstanden. Dieses Verständnis orientiert sich im Gegensatz zur vertikalen Substitution im Remanufacturing [13] und der Kombination von montage- und demontagefähigen Anlagenkonzepten (z. B. [14]) an dem prozessorientierten Verständnis hybrider Automatisierungskonzepte aus der Produktionstechnik [15].

Als Automatisierung wird die Verleihung der Fähigkeit automatisch gemäß *DIN IEC 60050-351* abzu- laufen bezeichnet, was definiert ist als „einen Prozess oder eine Einrichtung bezeichnend, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet“ [16]. Gemäß der Einteilung der Automatisierungsebenen nach *Heinrich et al.* [17] ist die automatisierte Demontage der Feld- und Anlagenebene zuzuordnen, da die betrachteten Prozesse die unmittelbare Erfassung und Verwertung von Daten zum Zweck der Ausführung einer produktiven Tätigkeit beinhalten. Der Automatisierungsbegriff wird gemäß dieser Definition verstanden. Die hier konzeptionierte Anlage folgt einer hybriden Automatisierungsstrategie unter Zuhilfenahme der *Mensch-Roboter-Interaktion* (MRI).

In Abgrenzung zu vollautomatisierten, geschlossenen Roboterzellen wird im Rahmen der MRI zwischen unterschiedlichen Interaktionsstufen unterschieden (siehe Abbildung 2.2). Neben einer völlig unverknüpften Koexistenz innerhalb eines nicht physisch getrennten, aber unabhängigen Arbeitsraumes fin-

den sich synchronisierte Tätigkeiten in gemeinsamen Arbeitsräumen, bei denen jeweils nur ein Interaktionspartner im Arbeitsraum befindlich ist. Von echter Kooperation wird gesprochen, wenn Mensch und Roboter an gemeinsamen Aufgaben, nicht jedoch gleichzeitig an gemeinsamen Bauteilen arbeiten. Unter *Mensch-Roboter-Kollaboration* (MRK) wird darüber hinaus ein kooperativer Betrieb des Robotersystems mit menschlichen Arbeitskräften in einer gemeinsamen Arbeitsumgebung und unter einer gemeinsamen Zielsetzung verstanden [18]. Der Begriff der MRK wird in dieser Arbeit inklusiv verwendet und schließt sowohl kooperative als auch kollaborative Tätigkeiten ein, da das Forschungskonzept grundsätzlich die gemeinsame Arbeit an gleichen Bauteilen einschließt jedoch auch zeitweise lediglich kooperativ agiert. Eine Ausentwicklung der erforderlichen Sicherheitskonzepte für eine betriebliche Anlage im industriellen Kontext ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

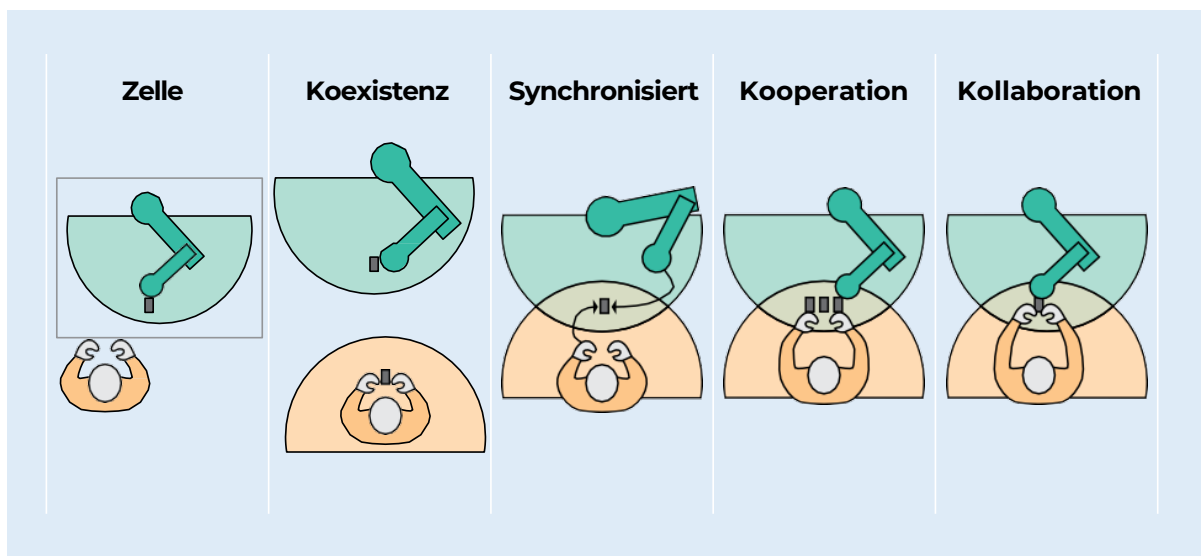


Abbildung 2.2: Unterschiedliche Arten der Mensch-Roboter-Interaktion nach [19]

Die *funktionelle Integrität* beschreibt dem Wortsinn nach die funktionsbezogene Unversehrtheit bzw. Vollständigkeit von Baugruppen und Einzelkomponenten. Entgegen quantitativer Bewertungskriterien handelt es sich bei der funktionellen Integrität um ein rein qualitatives Merkmal mit binärer Ausprägung; ein Bauteil kann also entweder seine ihm zugedachte Funktion erfüllen oder nicht. Es handelt sich dabei um ein Schlüsselkriterium für die möglichen Verwertungsoptionen, da es eine wesentliche Voraussetzung für die Wiederverwendbarkeit darstellt. Die *recyclinggerechte bzw. demontagegerechte Produktgestaltung* nach VDI 2243 [20] befasst sich mit Richtlinien zur verwertungsfreundlicheren Gestaltung von Produkten im Kontext eines geschlossenen Verwertungskreislaufes. Obwohl die in der Richtlinie vorgeschlagenen Produkteigenschaften die Recycling- und Demontageeignung maßgeblich verbessern, werden diese im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter diskutiert. Die Konzeption und Entwicklung der adaptiven Demontageanlage befasst sich mit dem Umgang mit aktuellen, variantenreichen Produkten und unterschiedlichen Verbindungsarten. Diese bilden die Basis für die hier entwickelten Methoden. Eine Umsetzung der Hinweise aus der Richtlinie kann eine Steigerung der Demontageeffizienz bewirken, dies zu untersuchen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Forschung. Weiterhin ist es nicht Thema dieser Arbeit konkrete Verfahren und Werkzeugstrategien zur Demontage spezifischer Produkte zu entwickeln. Wie in Kapitel 3 beschrieben, befasst sich diese Arbeit ausschließlich mit der Erforschung einer geeigneten Methodik für die teilautonome, robotergestützte Demontage von Produkten am Beispiel der Demontage von Elektro-Traktionsbatterien. Daraus erfolgt weiterhin eine inhaltliche Abgrenzung zur Erforschung der ganzheitlichen Verwertungsprozesse von Elektro-Traktionsbatterien. Über

eine Berücksichtigung erforderlicher Eigenschaften und der Produktstruktur hinaus werden keine spezifischen Inhalte, insbesondere solche von verfahrenstechnischer Bedeutung untersucht.

Einen wesentlichen Bestandteil der erforschten Methodik stellt der produktbezogene Informationsprozess dar. Die Handhabung von Prozess- und Produktinformationen aus Unternehmenssicht über den gesamten Produktlebenszyklus ist Gegenstand des *Product-Lifecycle Managements* (PLM) [21]. Eine Erweiterung dieses Konzeptes in Bezug auf die Berücksichtigung von Verwertungsprozessen und den Einsatz wiedergewonnener Sekundärrohstoffe stellt das *Closed-Loop Product-Lifecycle Information Management* [22] dar. Die in dieser Arbeit untersuchten Informationen fallen unter diesen Begriff, da der Austausch von Daten und Informationen bis hin zu Wissen zwischen den einzelnen Akteuren im Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsprozess eine elementare Voraussetzung darstellt. Bei der digitalen Abbildung von Produktstrukturen und Eigenschaften wird der Begriff des *digitalen Modells* verwendet. Im Kontext eines intelligenten, digitalen Abbildes eines realen Produktes oder Prozesses gewinnt der Begriff *digitaler Zwilling* verstärkt an Bedeutung [23]. Aufgrund der höchst unterschiedlichen Definitionsbereiche und der dynamischen Entwicklung in diesem Themenfeld wird diese Benennung in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet.

Das Verständnis von *Daten*, *Informationen* und *Wissen* baut auf der von *Ackoff* [24] veröffentlichten Hierarchie auf (siehe Abbildung 2.3). Daten bilden die Grundlage aller möglichen Verständnisprozesse und stellen selbst Symbole dar, die in einer rohen Form Eigenschaften von Objekten und Ereignissen repräsentieren. Der Unterschied zu Informationen ist ein funktioneller, kein struktureller. Es bedarf also der Interpretation von Daten im Kontext einer spezifischen Funktion, um daraus Informationen abzuleiten. Eine Reorganisation, also eine strukturelle Ordnung, kann auf Grundlage einer solchen Interpretation erfolgen, ist dabei allerdings immer *a posteriori* zu betrachten und kann keine Ursache derselben sein. Wissen wird definiert als Information, die durch den Anwender verstanden und durch Evaluation abgesichert wurde [25]. Weisheit als höchste Stufe der Informationspyramide beschreibt die Fähigkeit, die Effektivität durch wertschöpfende Bewertung des Wissens zu steigern [26]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf die Verwendung von Weisheit als Begriff im Kontext der technischen Entwicklung von Bewertungsfunktionen verzichtet. Alle Eingangs- und Ausgangsströme umfassen Daten, aus denen Informationen abgeleitet werden können, die durch experimentelle Validierung zu Wissen werden. Der Gedanke der Wertschöpfung wird dabei in Form der untersuchten Methodik eingebracht.

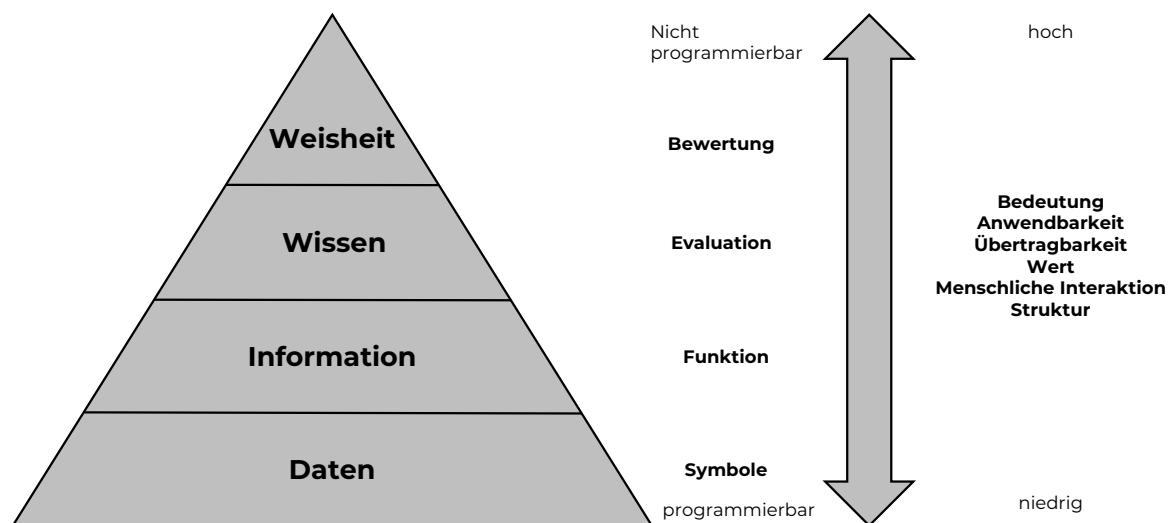


Abbildung 2.3: Informationswissenschaftliche Verständnishierarchie nach [26]

Informationsaggregation und der vermehrte Einsatz von cyberphysischen Systemen kennzeichnen die vierte industrielle Revolution, die sog. *Industrie 4.0* [27]. Das flexible Management von verteilten Anlagen und deren zielgerichtete Organisation unter einem gemeinsamen Optimierungsziel durch direkte Verknüpfung oder eine dezentrale Vermittlungseinheit (z. B. ein Cloud-System) charakterisiert dabei die Grundlage beispielhafter Systemmodellierungen [28]. Diese digitale Transformation der industriellen Produktionslandschaft stellt Technologien bereit, die auch in der Circular Economy nützlich sind. So kann durch den Einsatz von Digitalisierungstechnologien beispielsweise die Realisierung einer Kreislaufwirtschaft in neuen Bereichen weiter vorangetrieben werden, aber auch bereits bestehende Prozesse aus dem Recycling und der Abfallwirtschaft können weiter verbessert werden [2]. Neben der Zirkularisierung von Materialströmen sind es vor allem die Informationsströme, die für eine erfolgreiche Umsetzung ebenfalls durchgängig und digital entlang der gesamten Verwertungskette verknüpft werden müssen [29].

Ein derartiges Modell einer organisierten, digital verknüpften Kreislaufwirtschaft wird unter dem Begriff *Recycling 4.0* verstanden [30]. Die in dieser Arbeit konzipierten Systeme sind als in ein solches Framework integriert zu betrachten. Ein übergeordnetes, cloudbasiertes Informationssystem analog des in [31] vorgestellten Informationsmarktplatzes ist die Verknüpfung des Demontagesystems zu den anderen Stakeholdern der Kreislaufwirtschaft und damit zentraler Kontaktpunkt für den Informationsaustausch (näheres in Kapitel 4). Alle Schnittstellen des Demontagesystems werden im genannten Kapitel definiert. Die Konzeption und Entwicklung dieser angrenzenden Systeme ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Eine *Advanced Circular Economy* [32] (Abbildung 2.4) ist folglich ein System im Spannungsfeld zwischen Umwelt, Gesellschaft und Politik. Es bildet die gesamten Teilnehmer und Prozesse der Kreislaufwirtschaft ab, wobei unterschiedliche Verwertungsoptionen berücksichtigt werden. Ein multidirektionaler Informationsaustausch ermöglicht dabei die makroökonomisch/strategische und mikroökonomisch/operative Optimierung einzelner Prozesse sowie der gesamten Wirtschaftskette. Die folgende Arbeit stellt in diesem Sinne die Konzeption und Evaluierung einer Methodik zur Optimierung eines operativen Teilprozesses in diesem Framework dar.

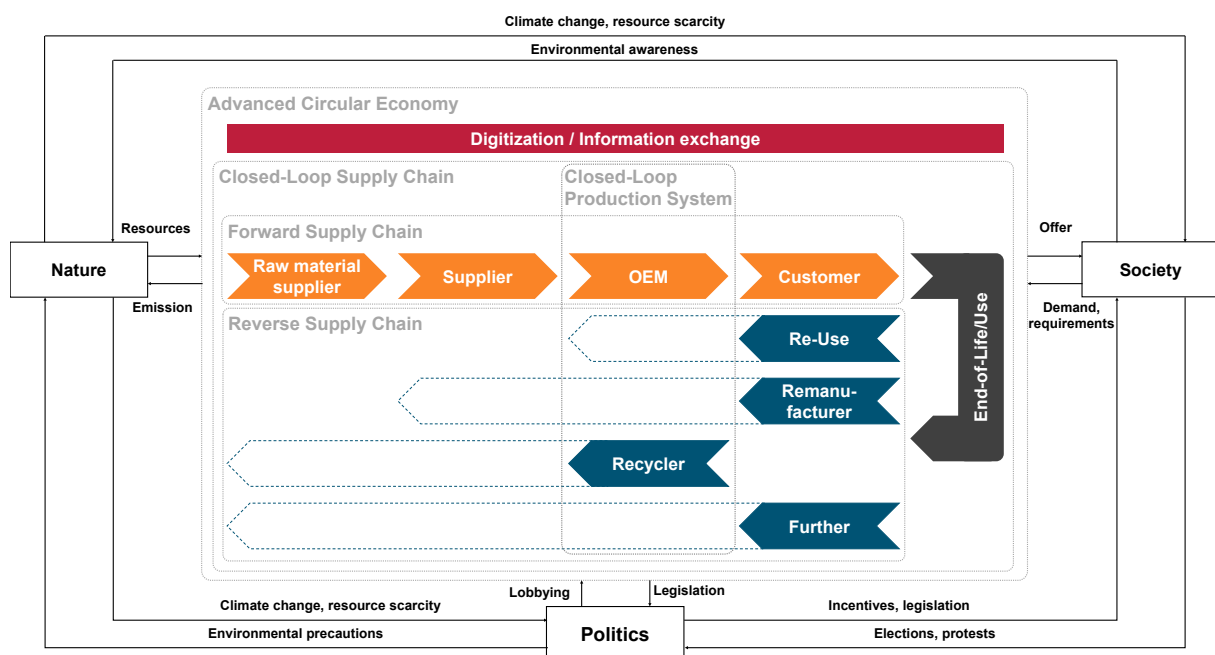


Abbildung 2.4: Prozessframework der Advanced Circular Economy nach dem Recycling 4.0 Ansatz [32]

2.2 Demontageprozess

Der Demontageprozess liegt der gesamten Forschungstätigkeit zu Grunde und stellt die Hauptursache der Beschäftigung mit der Automatisierung zur Steigerung der Effizienz als Motivation für diese Arbeit dar. Der überwiegende Teil der Anforderungen an das *Robot-Cognition*-Konzept resultiert aus der detaillierten Aufnahme des Demontageprozesses und der Anknüpfungsstellen innerhalb des Ökosystems der Kreislaufwirtschaft. Nach einer ausführlichen Einordnung und Darstellung des Demontageprozesses werden in diesem Unterkapitel die Probleme und Herausforderungen der Demontage in Bezug auf die wichtigsten Kategorien aufbereitet. Nach der eingehenden Betrachtung des Informationsflusses in der Demontage werden abschließend Ansätze der Demontageautomatisierung vorgestellt.

Die Demontage ist ein wichtiger Schritt im Recyclingprozess (siehe Abbildung 2.5). Eine Vorbehandlung von Abfallströmen muss immer dann stattfinden, wenn bestimmte Produkte, Komponenten oder deren Inhaltstoffe die weiteren Behandlungsstufen des Aufbereitungsprozesses empfindlich stören, Sekundärrohstoffe irreversibel kontaminieren oder zu problematischen Emissionen führen können [6]. Die *Schadstoffentfrachtung* kann in vielen Fällen eine rechtliche Erfordernis vor der weiteren Verwertung sein, z. B. müssen bei der Altfahrzeugverwertung Gefahrstoffe und umweltschädliche Inhaltstoffe vor der eigentlichen Verwertung entfernt werden [8].

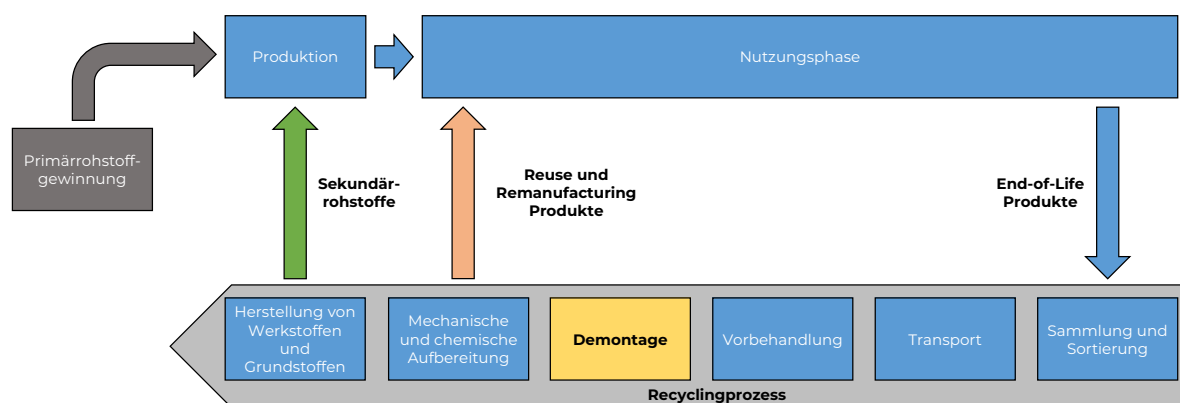


Abbildung 2.5: Einordnung des Recyclings und der Demontage in den Produktlebenszyklus

Über die übliche Vorbehandlung von Abfallströmen hinaus kann bei komplexen Produkten eine Demontage im Sinne der Vereinzelung sinnvoll sein. Die Motivation für die Demontage kann dabei aus verschiedenen Zielsetzungen heraus interpretiert werden [33]:

- Rückgewinnung wertvoller Komponenten und Baugruppen zur
 - Wieder- bzw. Weiterverwendung (Reuse, Second-Life)
 - Aufarbeitung (Remanufacturing)
 - Umwidmung (Repurpose)
- Selektive Rückgewinnung besonders wertvoller Materialien
- Zielgerichtete Entfernung von Fahrgut-Komponenten
- Erhöhung des Reinheitsgrades der verbleibenden Produktfraktionen
- Schaffung von Zugänglichkeit im Rahmen der erweiterten Vorbehandlung
- Minimierung ungewollter Rückstände, z. B. nach dem Schredder-Prozess

Die Demontage ist dabei der Prozessschritt mit dem höchsten manuellen Arbeitsaufwand und der größten Variantenvielfalt in Bezug auf das Produkt und dessen Zustände [34]. Ein allgemeiner Demontageprozess (Abbildung 2.6, [35]) beginnt mit der Annahme und Dokumentation der EoL-Produkte, bevor

nach einer produkt- und branchenabhängigen Reinigung eine erste Sichtung und Feststellung der Demontageeignung (häufig technisch, in einigen Fällen auch wirtschaftlich) stattfindet. Ist diese Sichtung positiv, kann das Produkt demontiert werden, ist sie negativ, wird das Produkt für eine abweichende Verwertung entweder dem stofflichen Recycling oder der Weiterverarbeitung für die Deponierung zugeführt. Die eigentliche Demontage, die Vereinzelung der Bauteile, erfolgt in der Regel in einem manuellen Prozess. Eine prozessabhängige Unterscheidung zwischen Zielkomponenten und Abfall wie Verbindungselementen und irreversibel beschädigten Produktbestandteilen kann hier bereits vorgenommen werden. Die demontierten Bestandteile werden in einem vierten Prozessschritt begutachtet und abhängig von ihrer funktionellen Integrität entweder einer Wiederverwendung bzw. Aufarbeitung oder dem stofflichen Recycling zugeführt.

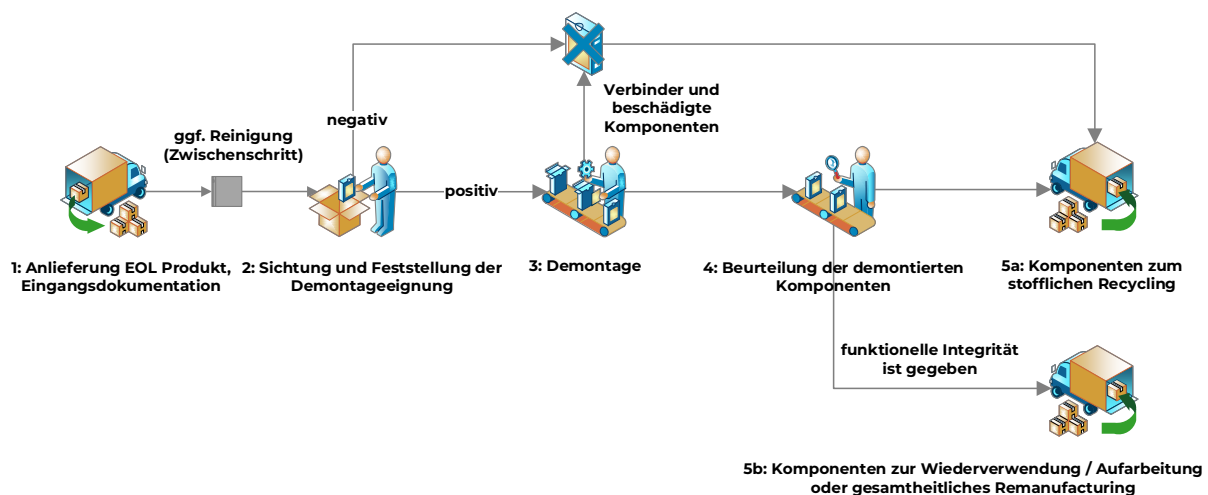


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines allgemeinen Demontageprozesses [35]

Das Ziel eines Demontageprozesses ist neben einem ökonomisch und technisch sinnvollen Demontagegrad sowohl die Kosteneffizienz des Gesamtprozesses als auch eine möglichst sortenreine Trennung der Grundwerkstoffe im Fall einer intendierten stofflichen Verwertung. Um die Demontageziele zu erreichen, stehen unterschiedliche Vorgehensweisen zur Disposition (siehe Abbildung 2.7). Hierbei wird generell zwischen der zerstörungsfreien, der teilweise zerstörenden sowie der vollständig zerstörenden Demontage unterschieden [34]. Die zerstörungsfreie Demontage ist ausschließlich bei lösbaren Verbindungsarten wie z. B. Schrauben möglich. Die Verbindungspunkte sind dabei vollständig durch die Produktstruktur definiert und müssen mit individuellen Werkzeugen gelöst werden. Bei der teilweise zerstörenden Demontage werden die Verbindungselemente zerstört, die Komponenten allerdings ohne Beschädigungen wiedergewonnen. Dies geschieht beispielsweise durch das Aufbohren von Clipsverbindungen. Die zerstörende Demontage berücksichtigt nicht notwendiger Weise die geometrischen Trennungen in der Produktstruktur, sondern ist in der Wahl der Aktionsflächen frei. Auf diese Art können auch stoffschlüssige Verbindungen getrennt werden, allerdings ist eine Beschädigung oder Zerstörung der einzelnen Komponenten dabei nicht vermeidbar. Da bei der zerstörungsfreien Demontage der Werterhalt im Produkt sehr hoch ist, eignet sich diese Vorgehensweise dort, wo sie technisch möglich ist, zur Demontage von Komponenten und Baugruppen für die Wiederverwendung oder Aufarbeitung. Der Nachteil dieser Methode ist vor allem der hohe Zeitaufwand und die daraus resultierenden hohen Kosten der Demontageoperation. Die größte Flexibilität und Effizienz in Bezug auf die Prozesswirtschaftlichkeit bietet hingegen die zerstörende Demontage, da hier auch die wenigsten Informationen zum Produkt bekannt sein müssen und für die Demontage selbst der geringste Zeitaufwand erforderlich ist. Das wirt-

schaftliche Optimum in Bezug auf den gesamten kreislaufwirtschaftlichen Prozess unter Berücksichtigung der verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten liegt in den meisten Fällen im Bereich der teilweise zerstörenden Demontage, ist allerdings auch von weiteren Faktoren abhängig [36].

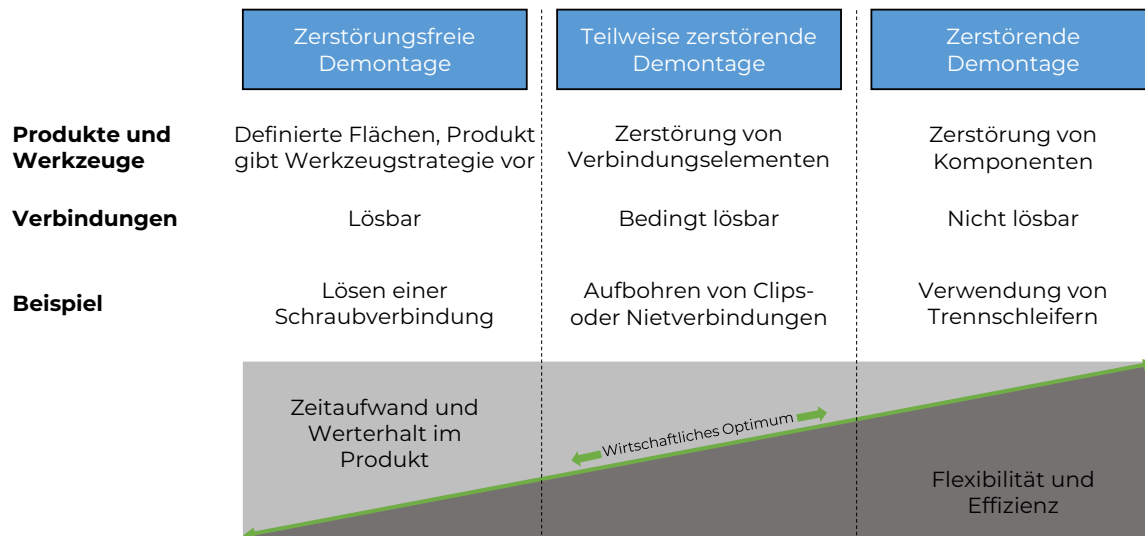


Abbildung 2.7: Arten der Demontage und deren Auswirkung auf den Gesamtprozess

Die richtige Demontagestrategie ist von organisatorischen, produktbezogenen und prozessbezogenen Faktoren abhängig [37]. In Bezug auf die Gestaltung eines Prozesses lassen sich die Herausforderungen in fünf Problemfeldern kategorisieren (Abbildung 2.8). Die hohe Varianten- und Zustandsvielfalt bei Recyclingprozessen ist die größte Herausforderung das *Produkt* betreffend. Eine oft mangelnde Demontierbarkeit aufgrund der nicht recyclinggerecht konstruierten Verbindungselemente ist das Ergebnis von Kosten- und Gewichtsoptimierung in einer allein auf die Fertigung und die Nutzungsphase ausgerichteten Produktentwicklung. Bei einer beabsichtigten Wiederverwendung oder Aufbereitung von Komponenten spielt darüber hinaus das Schadensrisiko eine wichtige Rolle bei der Prozessgestaltung. Im *Prozess* ist vor allem der Planungsaufwand für eine Demontage enorm. Ein geringer Technisierungsgrad ist oft die Folge der Variantenvielfalt und der aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbaren Automatisierung. Im Bereich der *Mitarbeitenden* ist die Demontage geprägt von einem hohen Personalaufwand und einer hohen Fluktuation aufgrund des niedrigen Qualifikations- und damit Lohnniveaus. In der *Logistik* ist die Transparenz und Planbarkeit von Lieferströmen ein entscheidender Faktor. Oft sind die Gesamtkosten und die Verfügbarkeit der Altprodukte (Engl. *core*), insbesondere in Bezug auf die Abnehmer der Demontageprodukte unklar. Darüber hinaus ist der Transport von Gefahrgut eine Herausforderung, die zahlreiche rechtliche Anforderungen und hohe Kosten mit sich bringt. Übergeordnet zu den genannten Kategorien ist es vor allem das *Informationsmanagement*, das im Demontageprozess nur defizitär ausgeprägt ist. Die Bedarfe im Kontext der Wirtschaftskette, Informationen zur Bauteilhistorie sowie das Wissen über die Verteilung wertvoller Materialien in den Komponenten sind in den wenigsten Fällen bekannt. Die sich aus diesen Problemfeldern ergebenden Herausforderungen stellen wesentliche Anforderungen an einen optimierten Demontageprozess bzw. ein optimiertes Demontagesystem dar. Eine wichtige Voraussetzung zum Umgang mit diesen ist die Kenntnis der Informationsflüsse entlang der einzelnen Prozessschritte sowie der angrenzenden Informationsquellen und -senken.

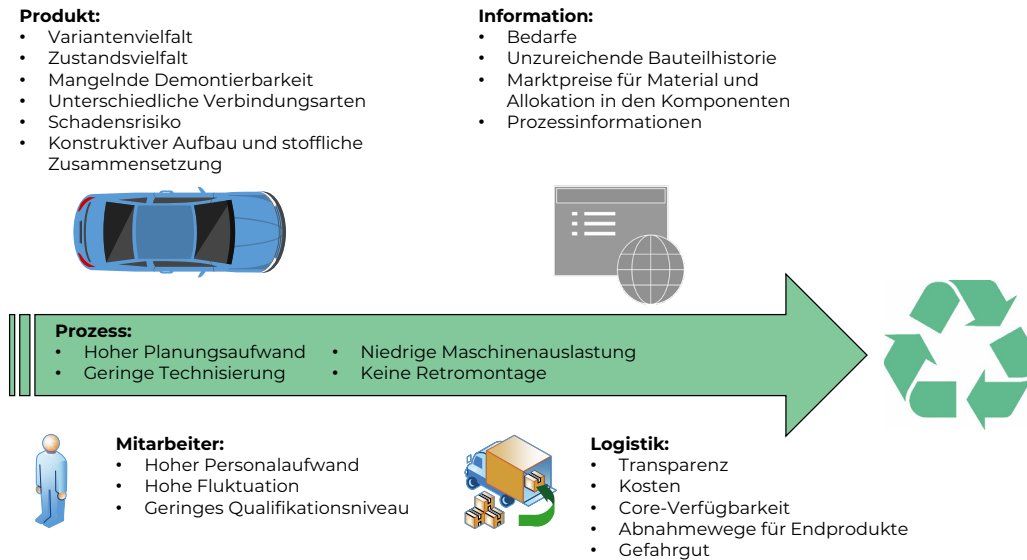


Abbildung 2.8: Problemfelder der Demontage nach Kategorien nach [35]

Ein durchgängiges Verständnis der Informationsflüsse über alle Prozessschritte der Demontage ist eine grundlegende Voraussetzung für die Optimierung und anschließende Automatisierung des Demontageprozesses. Jeder Prozessschritt lässt sich dabei in Teilprozesse aufteilen, für die es jeweils *vorhandene*, *erzeugte* und *zusätzlich benötigte* (externe) Informationen gibt (Tabelle 2.1). Die Produktbezeichnung und die Produktart sind dem Demontagebetrieb bekannt, genauso wie der gezahlte Preis für das EoL-Produkt. In der Anlieferung und Eingangsüberprüfung können erste Produktdaten wie das Gewicht und Informationen aus dem Logistikprozess gewonnen werden. Bei der Sichtung werden Informationen in Bezug auf den Zustand, die Variante und die Demontageeignung gewonnen. Um diesen Schritt bestmöglich ausführen zu können sind weitere, externe Informationen nötig, die dem Demonteur nicht originär vorliegen. Dies betrifft vor allem technische Dokumentationen (Produktaufbau, Gefahr- und Inhaltstoffe), Wirtschaftlichkeitsdaten und Lebenszyklusinformationen.

Tabelle 2.1: Informationsmanagement entlang des Demontageprozesses nach [38]

Prozessschritt	1. Anlieferung	2. Sichtung	3. Demontage	4. Beurteilung	5. Verwertung
Teilprozesse	-Wareneingang -Wiegen -Warenannahme -Erfassung der Produktbezeichnungen (soweit möglich) -Erfassung der Mengen und Varianten	-ggf. weitere Reinigung -Feststellung der Produkttypen -Erfassung der Zustände -Bewertung von Risiken und Gefahrenpotenzialen -Bewertung der Demontageeignung (technisch) -Bewertung der Demontageeignung (wirtschaftlich)	-Bestimmung der Produktfolge -Bestimmung der Demontagesequenzen -Demontageoperation -Weitergabe demontierter Komponenten mit intakter Funktionsintegrität -Abscheidung (sortenrein) von zerstörten Verbindern oder Komponenten	-Beurteilung der Komponenten nach physischer Erscheinung -Einbezug vorliegender Verwendungsdaten -Entscheidung über das Verwertungsmodell in Rückkopplung mit Marktinformation (Wiederverwendbarkeit setzt funktionelle Integrität voraus)	-5a: Möglichst sortenreine Weitergabe der demontierten Komponenten ohne Perspektive einer wirtschaftlichen Aufarbeitung / Wiederverwendung -5b: Verpackung und Versand der wiederverwendbaren oder aufzuarbeitenden Komponenten oder ggf. direktes Remanufacturing

Information	für die Anlieferung	für die Sichtung	für die Demontage	für die Beurteilung	für die Verwertung
<i>vorhandene</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Bezeichnung -Produktart (Auto oder Waschmaschine) -Warenbegleitinformation -Preis EOL-Produkt 	<ul style="list-style-type: none"> -Bezeichnung -Produktart (Auto oder Waschmaschine) -Warenbegleitinformation -Gewicht -Transportinformationen -Zustand grob (Beschädigungen, Verschmutzungen etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> -Bezeichnung -Produktart (Auto oder Waschmaschine) -Warenbegleitinformation -Gewicht -Transportinformationen -Zustand grob (Beschädigungen, Verschmutzungen etc.) -Produktvariante (Modell, Derivat, Baustand, Inhaltstoffe) -Produktzustand (Beschädigungen, Verschmutzungen) im Detail -relevante Bauteile (Hauptkomponenten, Verbinder) -Demontageerfahrung 	<ul style="list-style-type: none"> -Bezeichnung -Produktart (Auto oder Waschmaschine) -Warenbegleitinformation -Gewicht -Transportinformationen -Zustand grob (Beschädigungen, Verschmutzungen etc.) -Produktvariante (Modell, Derivat, Baustand, Inhaltstoffe) -Produktzustand (Beschädigungen, Verschmutzungen) im Detail -relevante Bauteile (Hauptkomponenten, Verbinder) 	<ul style="list-style-type: none"> -Bezeichnung -Produktart (Auto oder Waschmaschine) -Warenbegleitinformation -Gewicht -Transportinformationen -Zustand grob (Beschädigungen, Verschmutzungen etc.) -Produktvariante (Modell, Derivat, Baustand) -Produktzustand (Beschädigungen, Verschmutzungen) im Detail -relevante Bauteile (Hauptkomponenten, Verbinder) -Wiederverwendbarkeit bestimmter Komponenten
<i>erzeugte</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Gewicht -Transportinformationen -Zustand grob (Beschädigungen, Verschmutzungen etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> -Produktvariante (Modell, Derivat, Baustand) -Produktzustand (Beschädigungen, Verschmutzungen) im Detail -Eignung zur Demontage 	<ul style="list-style-type: none"> -Zustände in nicht sichtbaren Bereichen -Demontagerienfolge (valide) -Methoden und Werkzeuge (valide) -Prozesszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> -Zustand einzelner Komponenten -Aussagen zur Beanspruchung einzelner Komponenten über das Produktleben -Wiederverwendbarkeit bestimmter Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> -Bauteilspezifische Quoten -tatsächlicher Preis -tatsächlicher Absatz
<i>zusätzlich benötigte</i>	-	<ul style="list-style-type: none"> -relevante Bauteile (Hauptkomponenten, Verbinder) -technische Dokumentation, Anleitungen -Wirtschaftlichkeitsinformationen -Informationen zu Füll- und Gefahrstoffen -Belastungs- und Lebenszyklusdaten 	<ul style="list-style-type: none"> -Demontagerienfolge -Methoden und Werkzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> -Preise für Komponenten und zu recycelnde Bauteile -aktuelle Nachfragesituation 	<ul style="list-style-type: none"> -Abnehmerinformationen und Logistik

Bei der eigentlichen Demontage werden die Demontagereihenfolge und der Demontagegrad benötigt. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze der Sequenzplanung und Festlegung der selektiven Demontage-tiefe. Mit Hilfe externer Informationen wird eine Demontagestrategie festgelegt und als Ergebnis des Prozessschrittes steht eine validierte Vorgehensweise als erzeugtes Wissen zur Verfügung. Für die abschließenden Schritte der finalen Bewertung der Demontageprodukte und die anschließende Verwertung sind vor allem Markt- und Abnehmerinformationen erforderlich. Als erzeugte Informationen werden die genauen Produkt- und Komponentenzustände sowie bauteilspezifische Quoten und reale Preise generiert. Informationen zur Zusammensetzung und technischen Dokumentationen der Bauteile fehlen in der Praxis oft.

In Bezug auf die Auslegung der Demontageoperationen wird zwischen der aktionsbezogenen *Sequenzplanung* und der allgemeinen *Planung* wie folgt unterschieden [39]:

- **Demontage-Sequenzplanung (DSP)** befasst sich mit der Fragestellung, *wie bzw. in welcher Reihenfolge* die Demontage durchgeführt werden sollte. Die Identifikation einer optimalen Demontagesequenz kann dabei unterschiedlichen Methoden folgen. Es wird dabei differenziert in *heuristische Methoden*, *metaheuristische Methoden* und *exakte Methoden*. Bei den heuristischen Methoden bilden algorithmische Regeln die Grundlage für die Findung „guter“ Lösungen mit einem geringen Zeitaufwand, allerdings mit dem Nachteil, dass unerwartete Produktklassen von der Heuristik nicht verarbeitet werden können. Sie basieren also auf prozessbezogenen Annahmen und setzen bereits einen gewissen Wissensstandard zum System voraus. Die metaheuristischen Methoden verwenden Modellierungsansätze sowie Suchstrategien und sind im Gegensatz zu den heuristischen Methoden nicht deterministisch und *unscharf* im Hinblick auf bestimmte Zielgrößen, da die sequenzbezogenen Entscheidungen stets das Ergebnis dynamischer Systeme sind, so z. B. mit Hilfe von Fuzzy-Logik, genetischen Algorithmen, neuronalen Netzen (NN) oder künstlichen Ameisenkolonien. Die Nachteile dieser Vorgehensweise liegen vor allem in dem hohen Berechnungsaufwand, der Notwendigkeit spezieller Systeme und der schwierigen Validierbarkeit der Ergebnisse, da es keine Referenz für ein tatsächliches Optimum gibt. Ein Alleinstellungsmerkmal der metaheuristischen Methoden ist die Anwendbarkeit auf Problemstellungen, die zu komplex oder zu groß für exakte Methoden sind. Die exakten Methoden folgen einer deterministischen, mathematischen Programmierung. Dies beinhaltet Suchalgorithmen, die jede mögliche Lösung des Problems auswerten sowie zu einem Optimum konvergierende Algorithmen (z. B. Simplex-Algorithmen, lineare Programmierung [40]). Der Vorteil dieser Lösungsfindung besteht vor allem in der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Nachteile treten vor allem dann auf, wenn es sich um nichtlineare und hochdimensionale Optimierungsprobleme handelt, deren mathematische Beschreibung nur noch mit numerischen Verfahren möglich ist (also ausschließlich mit metaheuristischen Methoden annäherbar).
- **Demontage-(Prozess)-Planung (DP)** befasst sich mit der Fragestellung, *wie tief* die Demontage gehen bzw. *wie hoch* der Demontagegrad sein sollte. Demontage kann grundsätzlich *selektiv* oder *vollständig* ausgeführt werden. Die Entscheidungen den Demontagegrad betreffend sind von zahlreichen Kriterien abhängig. Methoden, welche derartige Entscheidungen treffen, werden auch als *Multikriterien-Methoden* bezeichnet. Diese Vorgehensweisen enthalten üblicherweise zahlreiche Zielfunktionen, die es gleichzeitig zu optimieren gilt. Da dabei auch Zielkonflikte entstehen, ist die richtige Gewichtung der einzelnen Kriterien maßgeblich für den Erfolg der Optimierungsstrategie. Aufgrund der Schwierigkeit bei einer deterministischen Vorgehensweise die einzelnen Kriterien gezielt zu optimieren, werden in der Umsetzung häufig Pareto-optimale Zustände angestrebt, bei denen kein Merkmal stärker gewichtet werden könnte, ohne

das Gesamtergebnis nachweislich zu verschlechtern. In realen Fallbeispielen ist eine Entscheidung nach mehreren Kriterien erforderlich, da beispielsweise die Anforderungen an den Umweltschutz eine hinreichend starke Bedeutung haben, um nicht ausschließlich profitorientiert zu optimieren. Ein weiterer Aspekt der Demontageplanung ist das *Line Balancing*, also die innerbetriebliche Arbeitsvorbereitungs- und Kapazitätsplanung in einem Mehr-Stationen-Demontagesystem.

Die Planung der Demontagesequenz und der Demogtetiefe bestimmt den Gesamtaufwand der Demontageoperation maßgeblich. Die dedizierte ökonomische Bewertung dieses Prozesses ist erforderlich, da Demontagekosten in einem *Lifecycle-Assessment* (LCA) nur einen ungenau bestimmaren Kostenanteil bilden, der für die detaillierte, produktbezogene Entscheidungsfindung nicht ausreicht [41]. Es kann daher in sehr allgemeinen Entscheidungsmodellen dazu kommen, dass Produkte, welche eine hohe Anzahl an wiederverwendbaren Bauteilen aufweisen, trotzdem vollständig stofflich recycelt werden. Eine exakte Bewertung der gesamten Demontage ist aufgrund zahlreicher Informationsdefizite im Unterschied zu Montageaufgaben oft nicht möglich. Um den Demontageaufwand trotzdem vollständig zu quantifizieren und damit eine verlässliche ökonomische Bewertung zu ermöglichen, gibt der *Disassembly-Effort-Index* (DEI) einen vergleichbaren, für manuelle Demontageprozesse validierten Wert wieder [42]. Es gliedert die Demontage in vier Teilkostenbereiche:

- EoL-Produkthandhabung
- Trainingskosten der Mitarbeiter und Anleitungen
- Produktdemontage
- Bauteil- und Materialhandhabung

Der DEI-Faktor lässt sich empirisch aus sieben Kategorien bilden: Zeit, Werkzeugeinsatz, Produktfixierung, Zugänglichkeit, Instruktionsaufwand der Mitarbeiter, Gefahrenpotenzial und erforderliche Kräfte. Für jede der Kategorien ergibt sich ein Score, der anhand einer Tabelle aus [42] gebildet werden kann. Die Gesamtkosten der Demontage (C_D) lassen sich wie folgt errechnen:

$$C_D = \alpha * (T_D) + \beta * (DEI) \quad (1)$$

Wobei T_D die Demontagezeit darstellt. Der Faktor α repräsentiert den Brutto-Personalkostensatz der Demontageeinrichtung. Dieses Produkt ist somit der Anteil der variablen Kosten. Mit dem DEI wird β multipliziert, das die indirekten (fixen) Kosten des Demontagebetriebs repräsentiert. Dieser individuelle Faktor muss für jeden Betrieb auf Grundlage durchgeführter Demontageoperationen experimentell ermittelt werden. Eine standardisierte Bewertungsmethodik zur allgemeinen Beschreibung des Aufwandes von automatisierten Demontageprozessen existiert nicht und die DEI-Methodik ist nur eingeschränkt auf diese anwendbar. Aufgrund des deutlich höheren Maschineneinsatzes gewinnen Auslastung und Kapazitätsplanung in diesen Bereichen eine größere Bedeutung, da gerade der fixe Kostenanteil wesentlich höher ist. Eine Automatisierung reduziert grundsätzlich gemäß Formel 1 nur die Bestandteile des ersten Teils der Gleichung. Die Demontagezeit ist dabei prozessabhängig und es gibt mehrere Vorgehensweisen diese zu bestimmen.

Ein Ansatz die Demontagezeit eindeutig und auf eine standardisierte Vorgehensweise zu bestimmen stellt die *eDIM*¹-Methodik dar [43]. Ein Schlüsselement dieser Methodik ist die Bewertung der Demontierbarkeit unter dem Aspekt einer zerstörungsfreien Demontage für werterhaltende Verwertungsmöglichkeiten im Rahmen der Kreislaufwirtschaft. Hintergrund der Entwicklung dieser Methodik, die

¹ Engl. Akronym: *ease of Disassembly Metric*

in Zusammenarbeit mit der Europäischen Kommission entstanden ist, ist die Verifizierbarkeit durch eine dritte Partei, z. B. Marktüberwachungsbehörden. Der Grad der Demontageeignung kann dabei durch absolute Metriken wie Zeit, Energie und Entropie oder relative Metriken wie Konstruktionseffizienz dargestellt werden (nach [44]). Aus diesen Kategorien ist die Zeit als der Faktor mit der besten Möglichkeit zur Gewinnung der relevanten Daten ausgewählt worden. Die Demontagezeit kann entweder durch Messen eines realen Prozesses oder durch die auf Produktparametern basierende Kalkulation ermittelt werden [43]. Für die *eDIM*-Methodik wird auf die Berechnung der Zeit zurückgegriffen, da eine direkte Messung für jeden Prozessschritt sehr arbeitsaufwendig und nur in einer standardisierten Umgebung reproduzierbar wäre. Zur Berechnung der Demontagezeit wird dabei *produktbezogen* auf Grundlage der Produkteigenschaften und Verbindungsarten oder *prozessbezogen* auf Basis der einzelnen erforderlichen Bewegungen vorgegangen. Nach einer Evaluation der gängigsten Methoden (*U-Effort* [45], *Philips-Methode* [46], *Desai & Mital* [47] sowie *Kroll et al.* [48]) kommen *Vanegas et al.* [43] zu dem Ergebnis, dass die Demontagezeit als Maß für die Demontierbarkeit folgendermaßen definiert ist:

$$T_D = eDIM = \sum_{i=1}^{i=n} (TC_i + ID_i + MAN_i + POS_i + DIS_i + REM_i) \quad (2)$$

Die Bestandteile der Summe sind dabei die einzelnen Teilprozessschritte des definierten Ablaufs:

- *TC = Tool Change* Werkzeugwechselzeit
- *ID = Identifying* Identifikationszeit
- *MAN = Manipulation* Handhabungszeit
- *POS = Positioning* Positionierzeit
- *DIS = Disconnection* Trennzeit (Lösen von Verbindungselementen)
- *REM = Removing* Zeit zum Entfernen der Komponenten aus dem Arbeitsraum

Um die produktspezifischen Elemente zur Zeitbestimmung in einer standardisierten Form berücksichtigen zu können, wird eine Datenbank mit einer definierten Taxonomie verwendet. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass Subjektivitätseinflüsse bei der Prozessbewertung die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verfälschen. Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung von Zeitelementen neben der *eDIM*-Methodik stellen *Systeme vorbestimmter Zeiten* aus der industriellen Planung dar. Individuelle Methoden zur Arbeitsablauf-Zeitanalyse, wie beispielsweise MTM (Engl. *methods-time measurement*, siehe [49]) finden vielfache Anwendung in der Fertigungsplanung und bieten aufgrund der großen Bestimmungstiefe eine verlässliche Basis für vergleichbare Zeitstudien. Ein weiterer Vorteil ist die weite Verbreitung in Industrieunternehmen und damit eine hohe Relevanz im Bereich von potenziellen Kreislaufprozessen.

Das EoL-Produkt kann in *Bauteile* und *Verbindungselemente* differenziert werden [39]. Eine Komponente ist dabei ein Bauteil mit einer intendierten Funktion bzw. mit einer für die Funktion notwendigen, definierten Materialzusammensetzung. Ein einzelnes Bauteil kann nur zerstörend weiter demontiert (bzw. zerkleinert) werden. Ein Verbindungselement stellt eine physische Verbindung zwischen zwei oder mehr Bauteilen her, deren Trennung der Zweck der Demontageoperation ist. Verbindungselemente, bei denen es sich um diskrete Maschinenelemente wie z. B. Schrauben handelt, werden als *quasi-Bauteile* beschrieben. Verbindungselemente wie Schweißnähte oder Lötstellen, die nicht diskret vorliegen sind laut [39] als *virtuelle Bauteile* zu betrachten. Die Produktstruktur wird dabei über ein Verbindungsdiagramm oder eine Demontagematrix entsprechend der Bauteile und der sie verknüpfenden Ver-

bindungselemente dargestellt (Abbildung 2.9) [50]. Das Verbindungsdiagramm (auch: Engl. *liaison diagram*) nutzt einen Graphen für die Darstellung der Produktstruktur. Die Bauteile werden dabei durch Knoten und die Verbinder durch Bögen repräsentiert. Diese Darstellungsform kann in unterschiedlichen Detailgraden auftreten. Die Demontagematrix (Abbildung 2.9; B) gibt die Verknüpfung der Bauteile in Form einer Matrix wieder, welche als Eingangsdatensatz für Optimierungsalgorithmen zur Berechnung der bestmöglichen Sequenz genutzt werden kann [50]. Die Demontagematrix ist eine symmetrische $N \times N$ Matrix, wobei N die Anzahl der Bauteile repräsentiert. Jedes Element der Matrix beschreibt eine Verbindung zwischen den Bauteilen, wobei eine „1“ eine existierende Verbindung darstellt und eine „0“ für keine Verbindung steht.

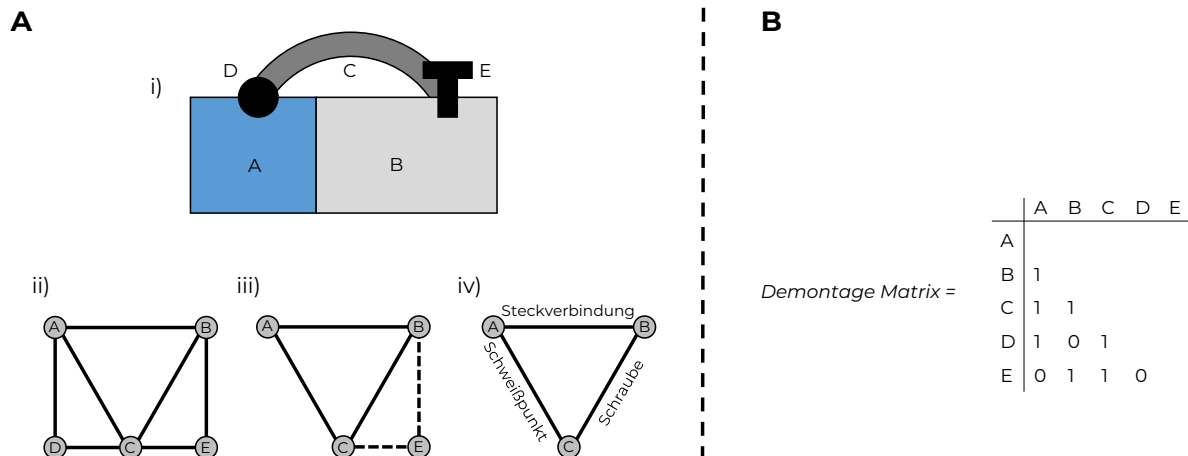


Abbildung 2.9: Verbindungsdiagramm (A) mit i) ZSB-Darstellung, ii) erweiterte Form, iii) reduzierte Form mit quasi-Bauteilen und iv) minimale Form sowie Demontagematrix (B) nach [50]

Die traditionellste und einfachste Form der Darstellung eines Demontageprozesses auf Grundlage der Produktstruktur ist der Vorranggraph (Engl. *disassembly precedence graph*) [51]. Die Repräsentation der Operation durch seine Teilprozesse, dargestellt in einem Graphen (siehe Abbildung 2.10) stellt gleichsam ein differenziertes Modell des Produktes und dessen Struktur dar. Die Gliederung des Produktes in unterschiedliche Ebenen ist dabei an die Erreichbarkeit der Bauteile geknüpft. Alle Bauteile derselben Ebene sollten erreichbar sein, wenn die Bauteile der Ebene darüber bereits demontiert sind. Der Detaillierungsgrad der Vorranggraphen lässt sich dabei von übergeordneten Baugruppenstrukturen bis hin zu detailgetreuen Abbildungen der gesamten Stückliste des Produktes visualisieren. Die Darstellungsweise kann dabei sowohl prozess- als auch bauteilorientiert sein. Demontagevorranggraphen entsprechen methodisch den in der industriellen Fertigung genutzten Montagevorranggraphen (Werkzeug der Montage-Prozessplanung [52]). Zustandsgraphen (*State Diagrams*, Abbildung 2.10, iv)), Demontagebäume (*Disassembly Tree*) sowie AND/OR-Graphen stellen weitere Formen der Prozessvisualisierung dar [39, 50]. Bei der Darstellung von Zustandsgraphen wird dabei entweder bauteil- oder verbindungsbezogen vorgegangen (Abbildung 2.10., iv, c) und iv, d)). Ein klassischer Demontagebaum stellt die mögliche Demontagesequenz in einer Baumstruktur dar, kann allerdings nicht alle Möglichkeiten gleichzeitig in einem Graphen darstellen und gilt daher als überholt [39]. AND/OR-Graphen repräsentieren die Produktstruktur des EoL-Bauteils basierend auf dessen Stückliste oder deren CAD-Modell [53]. Die Knoten eines AND/OR-Graphen stellen die Unterbaugruppen und Komponenten des Produktes entsprechend der Ebenenstruktur dar. Da diese Graphen sämtliche Beziehungen zwischen den Bauteilen beinhalten, kann ihre Darstellung für umfangreiche Systeme sehr komplex werden.

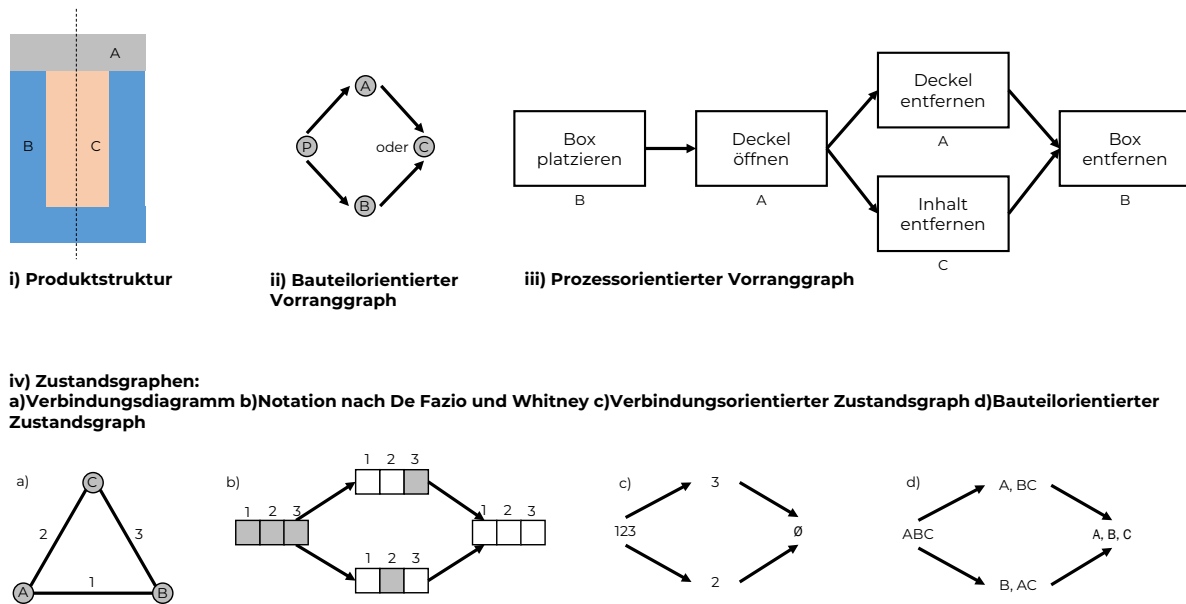


Abbildung 2.10: Vorranggraphen und abgeleitete Zustandsgraphen nach [39]

Neben diesen konkreten Ansätzen zur Planung und Ausgestaltung von Demontageprozessen auf Fertigungsebene gibt es übergeordnete Forschungsansätze zum Umgang mit Demontagethemen. In lebenszyklus-orientierten Konzepten findet eine Entwicklung hin zur idealisierten Kreislaufwirtschaft [29] mit *Closed-Loop-Supply-Chains* statt. Eine Konsequenz aus diesen Entwicklungen ist das Konzept der *Circulation Factory* [54]. Hierbei werden in der Regel wert- und stoffstrombezogene Abläufe entwickelt und untersucht. Eine Betrachtung der Demontagevorgänge auf der Technologieebene findet selten statt. Auch Arbeiten, die sich dezidiert mit Demontagefabriken befassen (z. B. [55]), gehen lediglich auf die schematische Planung manueller Demontageprozesse für spezifische Bauteile ein.

Zusammengefasst ergeben sich aus dem aktuellen Stand der Demontageforschung folgende Herausforderungen für eine Verbesserung der Prozesse im Kontext einer integrierten Kreislaufwirtschaft:

- Die Bewertung und Entscheidung in der Planung von Demontageprozessen kann bislang nur unzulänglich, basierend auf Verallgemeinerungen, getroffen werden
- Adaptive Planung im laufenden Prozess ist oft nicht möglich
- Manuelle Abläufe sind der Standard in der Demontage
- Informationsmanagement hat eine Schlüsselfunktion vor dem Hintergrund einer integrierten Kreislaufwirtschaft

Die Demontage ist ein komplexer Prozess mit zahlreichen Zielgrößen und Besonderheiten, der weit über die Idee einer simplen *Retromontage*, also eines rückwärtsgewandten Fertigungsprozesses hinausgeht. Als wichtiges Element aller Verwertungsprozesse, sei es zur Optimierung der wirtschaftlichen Effizienz von Wiederverwendungs- und Aufbereitungsstrategien oder zu einer Optimierung der stofflichen Materialrückgewinnung, trägt die Demontage zu einer ökonomischen und ökologischen Verbesserung der Produktkreisläufe in nahezu allen Branchen bei. Die Untersuchung dieser Prozesse als konkrete Operation in Bezug auf ein einzelnes Produkt, anstelle der Anwendung auf einen Massenstrom ermöglicht weitreichende Optimierungspotenziale in den genannten Bereichen durch die Automatisierung weiterer Teile des Ablaufes. Auf Grundlage der hier dargestellten Prozesse wird eine Methodik zur Optimierung der Effizienz durch Integration der erforderlichen Informationsflüsse und die teilautonome Automatisierung mittels Einsatz einer fortschrittlichen Robotiklösung angestrebt.

2.3 Robotik in der Demontage

Neben der direkten Annäherung über den Recyclingprozess und den Schritt der Demontage kann die Untersuchung auch aus der Richtung der Automatisierungstechnik und Robotik hergeleitet werden. Das folgende Unterkapitel betrachtet dazu nach einer kurzen Einführung zu den Trends und Entwicklungen in der Robotik den Automatisierungsprozess. Auf Grundlage der verschiedenen Automatisierungsklassifikationen können Schlüsselarbeiten zur Demontageautomatisierung mittels Robotik identifiziert werden. Die wichtigsten Arbeiten werden im Detail vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Auswertung der weiteren Forschungspotenziale und die daraus folgende Ableitung der Handlungsfelder für diese Untersuchung.

Als *Roboter* wird ein (um-)programmierbarer, multifunktionaler Manipulator zur Handhabung von Material, Bauteilen, Werkzeugen oder Sonderapparaturen durch programmierte Bewegungen sowie zur Ausführung von spezifischen Aufgaben verstanden [56]. Im Gegensatz zu anderen Handhabungseinrichtungen sind Roboter automatisch ansteuerbar und hinsichtlich Sollwertvorgaben frei programmierbar [57]. Der mechanische Aufbau eines Industrieroboters lässt sich durch kinematische Ketten beschreiben, die aus Gelenken und Achsen bestehen. Die letzte Komponente dieser Kette, die gleichsam auch den Arbeitspunkt des Roboters darstellt, wird als *Endeffektor* bezeichnet. Durch Achsbewegungen kann die *Pose* des Roboters verändert werden. Für eine flexible Bewegung im Raum benötigt der Roboter sechs Freiheitsgrade [58]. Abhängig von der Aufgabe und dem erforderlichen Arbeitsraum können verschiedene Robotertypen eingesetzt werden (z. B. Portalroboter, SCARA-Roboter, Vertikal-Knickarm-Roboter und Deltaroboter). Seit Jahren nimmt der weltweite Absatz von Industrierobotern kontinuierlich zu (siehe Abbildung 2.11). Von 2013 bis 2018 stieg die Anzahl neu installierter Einheiten im Schnitt um 19% pro Jahr, im Jahr 2019 entspricht die absolute Anzahl an Industrierobotern 2.439.543 Einheiten weltweit (+15% im Vergleich zum Vorjahr) [59]. Eine Verminderung des Anstiegs in den Jahren 2018/2019 ist auf die wirtschaftlichen Restriktionen im Handelskonflikt zwischen den USA und China zurückzuführen, da China mit ca. 37% der weltweiten Neuinstallation das am stärksten wachsende Land ist. Für die Jahre 2020 bis 2022 ist eine Korrektur aufgrund der Corona-Pandemie 2020/2021 wahrscheinlich.

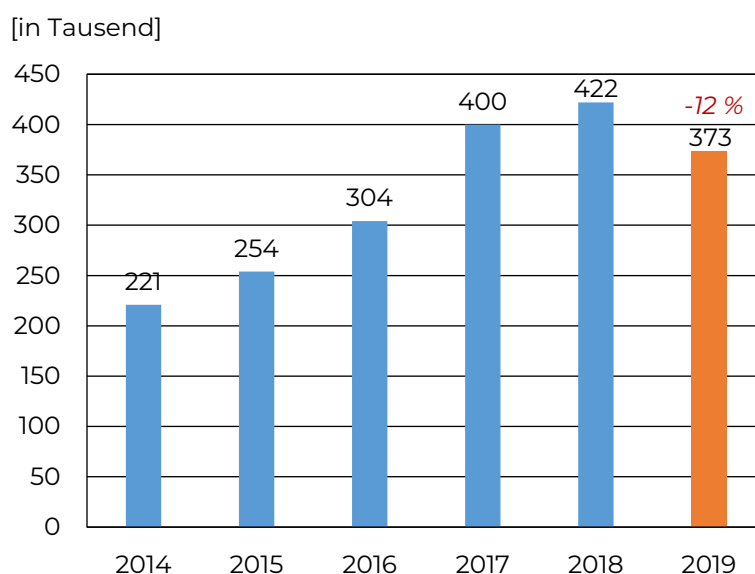


Abbildung 2.11: Weltweite Installation von Industrierobotern pro Jahr von 2014 bis 2019 [60]

Die Trends in der Entwicklung von Robotiksystemen, die zu deren starker Verbreitung beitragen sind vor allem:

- **Kosteneffizienz:** Aufgrund von Skaleneffekten bei der Fertigung sowie Verbesserungen bei Konstruktion und Steuerungstechnik werden Industrieroboter in Anschaffung und Betrieb preiswerter.
- **Leichtbaurobotik und MRK:** Bei einem stark verbesserten Verhältnis von Traglast zu Eigengewicht im Vergleich zu klassischen Industrierobotern spricht man von einem Leichtbauroboter (LBR) [18]. Aufgrund der geringeren Trägheit und eines sicherheitsorientierten Designs werden LBR häufig für MRK-Anwendungen eingesetzt [19].
- **Intuitive Benutzerschnittstellen:** Mit Hilfe von intuitiven User-Interfaces werden dem Anwender die für die Bewältigung einer Aufgabe erforderlichen Funktionalitäten eines Werkzeugs auf ergonomische Weise zugänglich gemacht [61]. Das verstärkte Aufkommen leicht bedienbarer Schnittstellen für die Roboterprogrammierung senkt die Qualifizierungsanforderungen und damit die Schwelle für den Einsatz von Industrierobotern.
- **Sensorik und Netzwerktechnologie:** Die Verknüpfung von realen und virtuellen Bestandteilen innerhalb von cyberphysischen Systemen sind ein wesentliches Charakteristikum der *Industrie 4.0* [62]. Die preiswerte Verfügbarkeit von Sensorik und deren Miniaturisierung erlauben einen vielfältigen Einsatz im Bereich der Robotik. Trends der Netzwerktechnologie wie *5G* und *Edge-Computing* wirken sich positiv auf diese Entwicklung aus.
- **Adaptive Greifersysteme:** Adaptive Greifer als Endeffektoren ermöglichen die Handhabung beliebiger Objekte ohne vorherige Definition von exakten Greifflächen. Dies ermöglicht den flexiblen Einsatz für zuvor unbekannte Bauteile und reduziert den Planungsaufwand.
- **Künstliche Intelligenz (KI):** Durch die stetig steigende Verfügbarkeit von Rechenleistung (vgl. *Moore's Law* [63]) können heute im direkten Fertigungsumfeld fortgeschrittene Methoden der KI, insbesondere des Teilgebietes *Machine Learning* eingesetzt werden. Auch Bilderkennungsverfahren zur Bauteilidentifikation werden heute zu einem häufigen Bestandteil von Robotik-Anwendungen.

Der Einsatz von Industrierobotern im Bereich der Demontage ist eine Folge des Bestrebens der Prozessautomatisierung. Wie in Abschnitt 2.1 definiert beschreibt die Automatisierung die Eigenschaft eines Prozesses ohne menschliche Einwirkungen abzulaufen. Die Zusammenhänge zwischen menschlicher Tätigkeit, Mechanisierung und Automatisierung in einem industriellen Prozess werden über den Automatisierungsgrad beschrieben. Die *Mechanisierung* eines Prozesses ist dabei in jedem Fall die Voraussetzung für die Automatisierung und ersetzt die Muskelkraft des Menschen durch Vorrichtungen und motorisierte Antriebe [64]. Automatisierungslösungen bestehen dabei aus der ausführenden Anlage, einer informationsverarbeitenden Komponente sowie Sensoren und Aktoren, welche die beiden Komponenten verbinden [65]. Die *Steuerungstechnik* beinhaltet die Speicherung und Handhabung von Informationen zum Zweck der Schaltung und Ansteuerung von Aktoren. Als *vollautomatisiert* wird demnach eine Anlage beschrieben, die nach einmaliger Programmierung und Bestückung ohne weitere Eingriffe die ihr zugedachten Aufgaben ausführt. Eine *teilautomatisierte* Anlage führt Teilaufgaben selbstständig aus, bedarf allerdings immer noch menschlicher Handlungen in Bezug auf andere Teilaufgaben, z. B. Parameterauswahl oder Handhabungsschritte. Teilautomatisierte Anlagenkonzepte werden auch *Semi-Automatisierung* beschrieben. Im Zusammenhang mit Demontage wurde dieser Begriff vor allem von *Knoth et al.* und *Kopacek et al.* geprägt [66, 67].

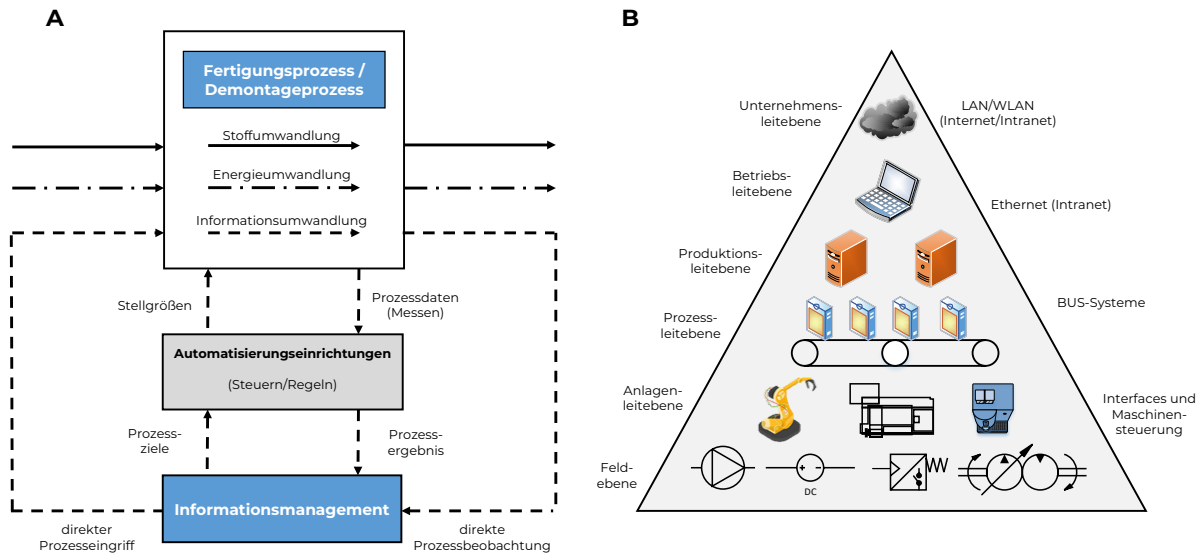


Abbildung 2.12: (A) Automatisierter Fertigungsprozess, (B) Automatisierungspyramide nach [68]

Bei Betrachtung der Demontageautomatisierung in Analogie zur Fertigung von Produkten, kann die Auswirkung von Automatisierungseinrichtungen vor allem unter dem Einfluss auf den Informationsprozess und als erweitertes Teilgebiet des Informationsmanagements betrachtet werden (Abbildung 2.12, A). Auf Grundlage von Prozessdaten werden Steuerungs- und Regelungsaufgaben ausgeführt und beeinflussende Stellgrößen in den Demontageprozess zurückgespielt. Die Einbindung in das Informationsmanagement erfolgt unter Maßgabe der festgelegten Prozessziele und unter (kontinuierlicher) Auswertung der Prozessergebnisse. Es gibt also einen systemischen Zusammenhang aus *Beobachtung* und *Eingriff* (Regelungsprinzip). Dieses Wirkungsprinzip gilt auch über den physischen Prozess hinaus für alle Ebenen des Unternehmens. So können die Anforderungen an die Kommunikationsstrukturen im Rahmen einer effektiven Automatisierung über alle Hierarchieebenen hinweg als verknüpft System dargestellt werden (Abbildung 2.12, B). Diese *Automatisierungspyramide* [68] stellt gleichzeitig auch den Zusammenhang aus Datenmengen und Reaktionszeiten dar. In den oberen Ebenen sind die Datenmengen groß, die Reaktionszeiten gering und in der Anlagen- und Feldebene ist es vor allem eine schnelle Reaktionszeit (bis hin zu Echtzeitkommunikation) bei geringeren Datenmengen, die erforderlich ist.

Der technische Aufwand der Automatisierung einer Demontageoperation ergibt sich aus dem Schwierigkeitsgrad der Handhabungsoperationen und Trennverfahren (vgl. [69]). Die Zugänglichkeit der Bauteile sowie deren Morphologie und Stabilität stellen dabei besondere Herausforderungen dar. Bei der Anwendung von Automatisierungslösungen in Unternehmen muss neben der technischen Machbarkeit einer Prozessautomatisierung auch und vor allem die wirtschaftliche Rentabilität berücksichtigt werden. Eine ausschließlich wirtschaftliche Betrachtung ist in Bezug auf die Demontage schwierig, da sich in bestehenden Unternehmen kaum eine positive wirtschaftliche Bewertung realisieren lässt [70]. Neben der über die wirtschaftlichen Aspekte hinausgehenden ökologischen Dimension verbesserter Recyclingprozesse können daher auf einer makroökonomischen Ebene ebenfalls die sozialen Auswirkungen berücksichtigt werden sowie im innerbetrieblichen Umfeld die Verbesserung von Ergonomie und die geringere Gefahrenexposition der Mitarbeitenden. Ein weiterer Grund für die Gestaltung von automatisierten Demontagesystemen kann, vor allem bei OEM, im Bestreben zum Remanufacturing eigener Komponenten oder in Image-Gründen liegen (vgl. [71] und [72]).

Allgemein sind die Anforderungen an die Demontageautomatisierung höher als an eine linearwirtschaftliche Fertigungsautomatisierung. Es gelten hier nach wie vor allgemeine Probleme als ungelöst, wie *Vongbunyong und Chen* auf Basis umfangreicher Untersuchungen zusammenfassen [50]:

- Bestimmung der Bewegungssequenzierung und Demontagereihenfolge
- Demontagegrad (technisch machbar vs. wirtschaftlich sinnvoll)
- Hohe Variantenvielfalt an Produkten und Produktzuständen
- Veränderungen des Marktbedarfs und der Preise
- Unzureichende Werkzeuge im Kontext von Verbindungsarten
- Kleine Losgrößen und unzureichende Logistik
- Berücksichtigung von Produktänderungen
- Unzureichende Werkzeuge
- Unzureichender Informationsfluss zu Produkt und Prozess
- Rechtliche Anforderungen an den Umgang mit Abfall- und Gefahrstoffen

Für den Einsatz von Robotiksystemen sind daher neben den eigentlichen Robotern als Manipulatoren weitere Systembestandteile erforderlich, um eine automatisierte Demontageanwendung zu realisieren (Abbildung 2.13). Ein modularer Aufbau und die Trennung nach Aufgaben in ein Planungs-, Wahrnehmungs- und Ausführungssystem bieten den Vorteil der Erweiterbarkeit und flexiblen Rekonfiguration [50]. Bei den bestehenden Anwendungen aus Wissenschaft und Industrie muss daher fundamental zwischen spezifischen Systemen zur Demontage bekannter Produkttypen und flexiblen Systemen zur Demontage von (teilweise) unbekannten Varianten und Zuständen unterschieden werden. Die mechanischen Systembestandteile sind diesbezüglich vor allem im Bereich der Werkzeugverwaltung betroffen, wobei im Gesamtsystem der Hauptunterschied in den Planungssystemen und den sensorischen Einrichtungen zu finden ist. Um den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik in diesem Bereich hinreichend genau zu erfassen, ist im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine umfassende Recherchearbeit durchgeführt wurden (siehe [73]). Dabei wurden in einer systematischen Literaturecherche (SLR) zahlreiche Datenbanken nach Arbeiten aus den Gebieten Robotik und Demontage durchsucht und ausgewertet.

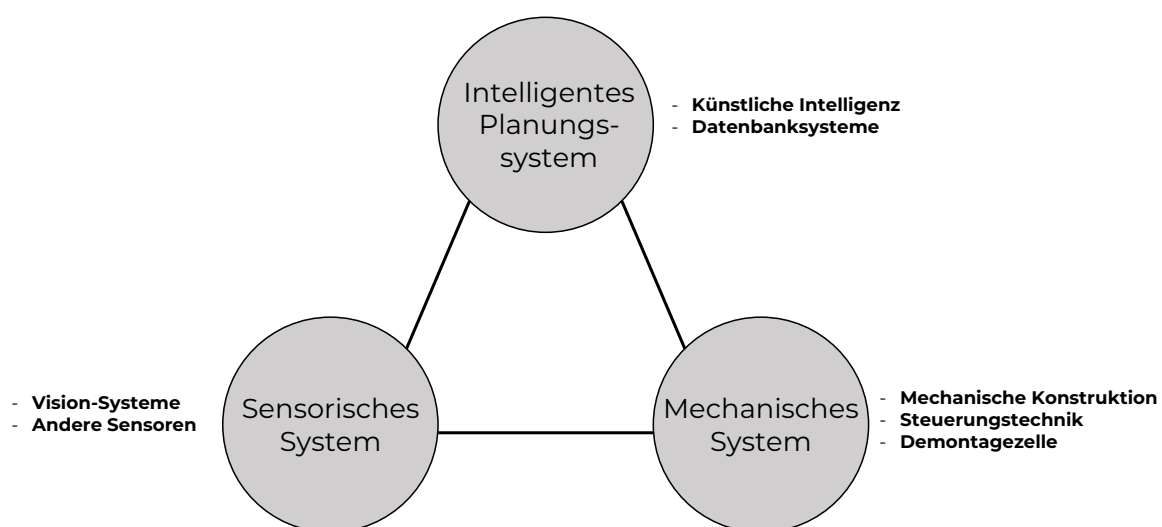


Abbildung 2.13: Allgemeiner Systemaufbau für die Demontageautomatisierung nach [50]

Im Ergebnis konnte ein Framework entwickelt werden, dass den derzeitigen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Demontageautomatisierung mittels Robotik kategorisiert und nachvollziehbar darstellt. Die Differenzierung und Zusammenfassung der einflussreichsten Arbeiten aus [73] sowie die zusätzliche Einordnung nach dem umgesetzten Automatisierungsgrad sowie der zulässigen Prozessvarianz ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

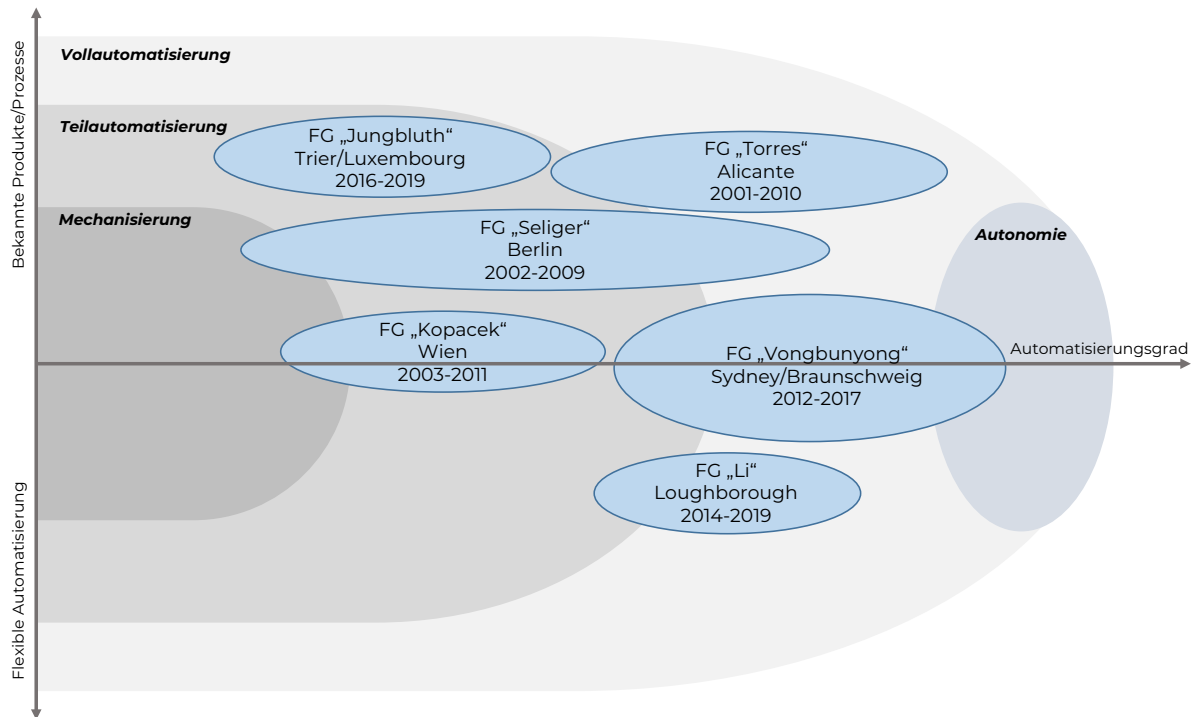


Abbildung 2.14: Erweitertes Framework der wichtigsten Forschungsgruppen (FG) zur Robotik in der Demontage

Als Grenze der in diesem Kapitel vorgestellten Arbeiten wurde das Jahr 2000 festgelegt. Arbeiten und Forschungsgruppen vor diesem Jahr liefern zwar wichtige Ergebnisse, diese sind mittlerweile allerdings technisch überholt und nicht mehr mit neueren Arbeiten vergleichbar. Die wichtigsten Ergebnisse dieser „alten“ Arbeiten stellen zudem die Grundlage für viele aktuelle Konzepte dar. Ein visionäres Konzept von *Shibata et al.* [74] aus dem Jahr 1994 nimmt z. B. bereits das System einer vollautomatisierten, flexiblen Demontage vorweg, allerdings ohne Nennung konkreter Umsetzungsstrategien.

Die Einteilung der Schlüsselarbeiten in Abbildung 2.14 erfolgt mit einer Gliederung der Veröffentlichungen nach den entsprechenden Forschungsgruppen (FG). Dies erlaubt die Zusammenfassung mehrerer Veröffentlichungen unterschiedlicher Autoren in dem gleichen Projektkontext bzw. der gleichen Forschungsausrichtung. Die Darstellung differenziert die Arbeiten der FGs dabei sowohl nach deren Automatisierungsgrad als auch nach der fundamentalen Unterscheidung bekannter Produkte (Produktdaten) und Prozesse und einer völlig flexiblen Demontage. Diese Unterscheidung hat im Kontext dieser Arbeit einen wichtigen Hintergrund, da der Informationsbedarf bzw. die Zuordnung von Informationsquellen und –senken in den jeweiligen Prozessen stark unterschiedlich ist. Im Unterschied zu [73] ist die Definition der *flexiblen Demontage* eine zwingende Konjunktion (logisches *und*) zwischen Produkt und Prozess, wohingegen in der Review-Arbeit eine Adjunktion (mindestens ein Fall muss zutreffen) verwendet wird. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Arbeit die Forschungsrichtungen, die sich ausschließlich mit abstrakter Sequenzplanung beschäftigen, bewusst nicht aufgeführt werden, da deren praktische Relevanz für die entwickelte Methodik im Vergleich zu den vorgestellten Beispielen nachrangig ist. In Kapitel 4 wird bei Bezugnahme auf diese ein direkter Verweis genannt.

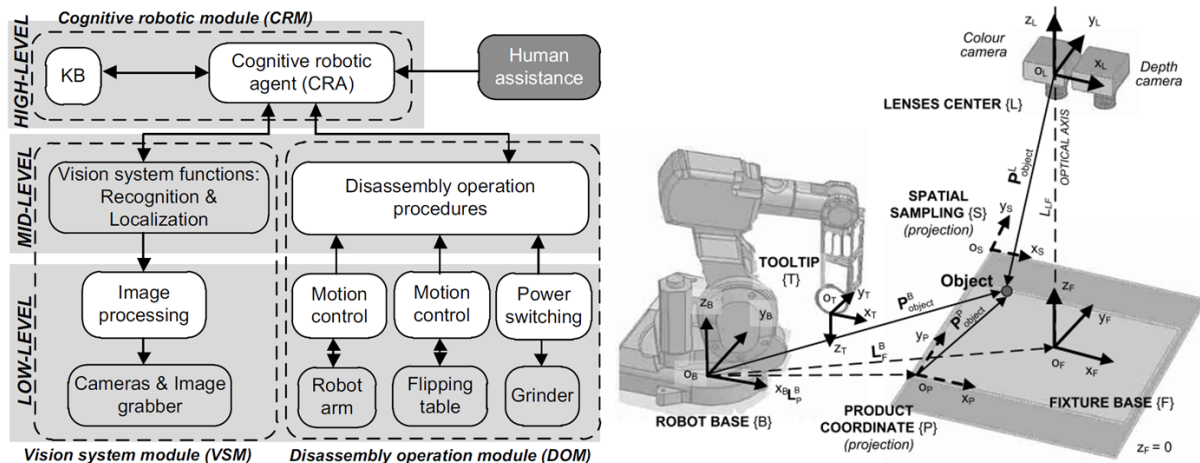


Abbildung 2.15: Systemarchitektur und konzeptioneller Aufbau der Demontageanlage aus Vongbunyong et al. [75]

Die Forschungsgruppe um **Vongbunyong** [50, 75–79] befasst sich mit der Untersuchung einer kognitiven Roboterarchitektur zur Demontage in einem variantenreichen Produktumfeld unter schwankenden Bedingungen [78]. Als Reaktion auf die größtenteils manuelle Demontage aufgrund unklarer Qualität und Quantität der Demontageobjekte wurde eine mehrstufige Architektur (siehe Abbildung 2.15) entwickelt, die sich aus kommunizierenden Agenten zusammensetzt, welche in der Lage sind autonom zu interagieren und auf eine dynamische Umgebung zu reagieren [77]. Am Beispiel der Demontage von LCD-Monitoren wird eine teilweise zerstörende Automatisierungslösung auf Grundlage von Bildverarbeitungstechniken umgesetzt, in der die kognitiven Funktionen Schlussfolgern, Betriebsdatenerfassung, Lernverhalten und Revision implementiert werden [76]. Grundlage stellen Produktdaten zu den Hauptkomponenten und der Struktur eines Produkttyps dar. Auf Basis der Bildverarbeitungseinheit und der kognitiven Eigenschaften ist die Anlage fähig mit einer heuristischen Vorgehensweise sämtliche Derivate des gleichen Typs mit Abweichungen im Detail der Komponentenstruktur zu demontieren. Der Erfolg der Demontageoperation wird durch die Betriebsdatenerfassung überwacht und im positiven Fall wird der angewandte Ablauf an eine Datenbank übergeben, aus der dann bei wiederholtem Auftreten des gleichen Produktes die *Anleitung* übernommen werden kann. Die Bildverarbeitungseinheit hat dabei die Aufgaben der Erkennung und Lokalisierung der Bauteile und der Verbindungselemente [75]. Darüber hinaus kann der Demontagegrad erkannt werden sowie während des Prozesses eine Veränderung des selbigen. Ein Problem bei der Umsetzung der Demontageanlage stellt vor allem die Erkennung kleiner Objekte wie z. B. von Schraubenköpfen im Rahmen der Bilderkennung dar, die nicht ausreichend realisiert werden konnte [75]. Ein weiterer Aspekt des Lernverhaltens kann durch die Eingabe in einem User-Interface erfolgen, um nicht autonom lösbare Aufgabenstellungen zu bewältigen. Eine Erweiterung diesbezüglich stellt ein System zur *Aufnahme* automatisierbarer Sequenzen aus manuellen Demontageprozessen dar [79].

Diese Anlage stellt zum Zeitpunkt des Forschungsprojektes das am weitesten entwickelte automatische Demontagesystem mit dem höchstmöglichen Grad an Flexibilität hinsichtlich Produktvarianten und Prozessgestaltung dar. Wiederum erfordert das Konzept eine Abstimmung auf einen spezifischen Produkttyp und kann daher nicht als generalisierte Methodik angesehen werden. Die Produktzustände werden darüber hinaus nicht für selektive Demontageentscheidungen berücksichtigt. Lebenszyklus-Daten und eine Anbindung der Demontageeinrichtung in einen gesamtheitlichen kreislaufwirtschaftlichen Ablauf sind in diesem Beispiel ebenfalls nicht umgesetzt. Es gibt keine Adaption von Wissen in Bezug auf ein Bauteil auf andere, ähnliche Bauteile, auch fehlt eine standardisierte Ontologie zur Übertragbarkeit des Prozesswissens in angrenzende Produktumgebungen.

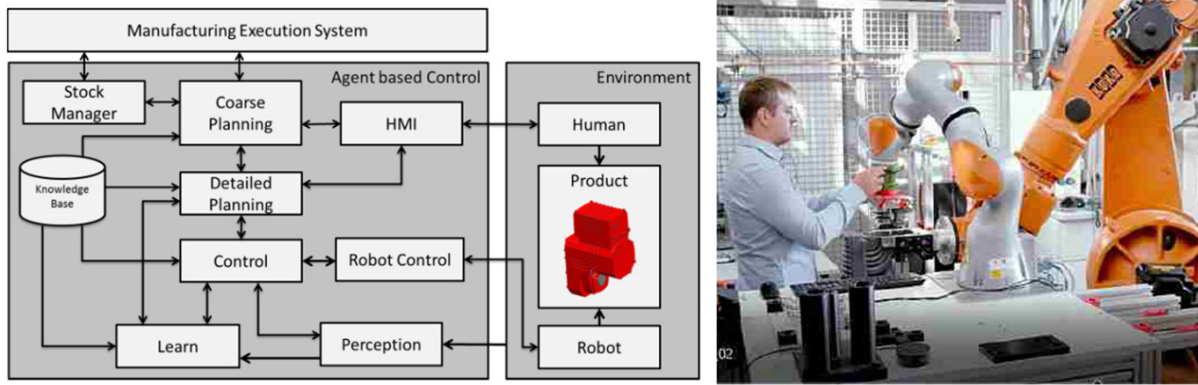


Abbildung 2.16: Systemarchitektur und Foto der kooperativen Demontageanlage aus [80] und [81]

Die Arbeiten von **Jungbluth** und dessen Forschungsgruppe [80–86] befassen sich mit der Entwicklung eines kooperativen Roboterassistenzsystems zur Demontage von komplexen Bauteilen. Auf Grundlage einer agentenbasierten Steuerungsarchitektur wird mit Hilfe eines Leichtbauroboters und eines Standard-Industrieroboters ein zerstörungsfreies Demontageszenario am Beispiel eines Elektromotors realisiert [82]. Für die Durchführung der Demontageaufgabe stehen dabei die vollständigen digitalen Produktinformationen und das Demontageziel zur Verfügung, wobei über ein entwickeltes Plug-In aus CAD-Daten der Komponenten direkt eine auf Basis der Bauteilhierarchie basierende Demontagegrobplanung und Ableitung eines Produktgraphen (in Form einer XML-Datei) erfolgt. Durch die Einführung von Bauteilklassen und die Zuordnung spezifischer Prozessinformationen, z. B. bezüglich der verwendeten Verbindungselemente, können dabei jedem Schritt die unmittelbar erforderlichen Methoden zugeordnet werden. Die Aktionsplanung ist dabei adaptiv und berücksichtigt relevante Vorbedingungen. Der Planungsalgorithmus wird für jeden Demontageschritt ausgeführt. Die dafür erforderlichen Systembestandteile sind in Form von aufgabenspezifischen Agenten organisiert [80]. Die in Abbildung 2.16 dargestellten Bausteine der agentenbasierten Steuerung erfüllen dabei jeweils Teilbereiche der Anforderungen für die assistierte Demontage bzw. steuern aktorische Systembestandteile wie Werkzeuge und Greifer. So sind beispielsweise die direkte Interaktion mit dem System sowie die Markierung beschädigter Bauteile über ein HMI-Modul (Engl. *Human-Machine-Interface*) möglich [86]. Für eine weitere Verbesserung der Usability wird mit Hilfe eines MQTT-Brokers eine Sprachsteuerung basierend auf einem *Raspberry Pi* Computer und der *Amazon Alexa* Spracherkennungsschnittstelle implementiert [84]. Im Rahmen des Konzeptes wird zwischen Produkt- und Prozesswissen differenziert, wobei das Prozesswissen die Verbindustypen, Relationen und die notwendigen Systemagenten und Werkzeugmodule sowie eine geeignete MRK-Strategie umfasst [83]. Eine Überwachung der Prozessausführung ermöglicht überdies die Synchronisierung der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter in einer flexiblen Ablaufgestaltung.

Das System von *Jungbluth et al.* ist durch die MRK ein teilautomatisiertes System, das keine Autonomie im Prozessablauf im Sinne einer ausschließlich maschinellen Demontage anstrebt. Es funktioniert nur für bekannte Produkte und ist nicht in der Lage Varianten ohne eine vollständige Bereitstellung der Produktdaten zu adaptieren. Mögliche Weiterentwicklungspotenziale neben einer Erhöhung der Autonomie liegen vor allem in der Verbesserung der Sicherheitseinrichtungen durch Bewegungsüberwachung der Mitarbeitenden sowie ein individuelles Erlernen der spezifischen Nutzer für eine weitere Verbesserung der Kooperationsfähigkeit [81]. Die angewandte Planungsalgorithmik hat in dem veröffentlichten Systemkonzept darüber hinaus keine Entscheidungs- und Schlussfolgerungsfähigkeiten für eine optimierte, selektive Demontage.

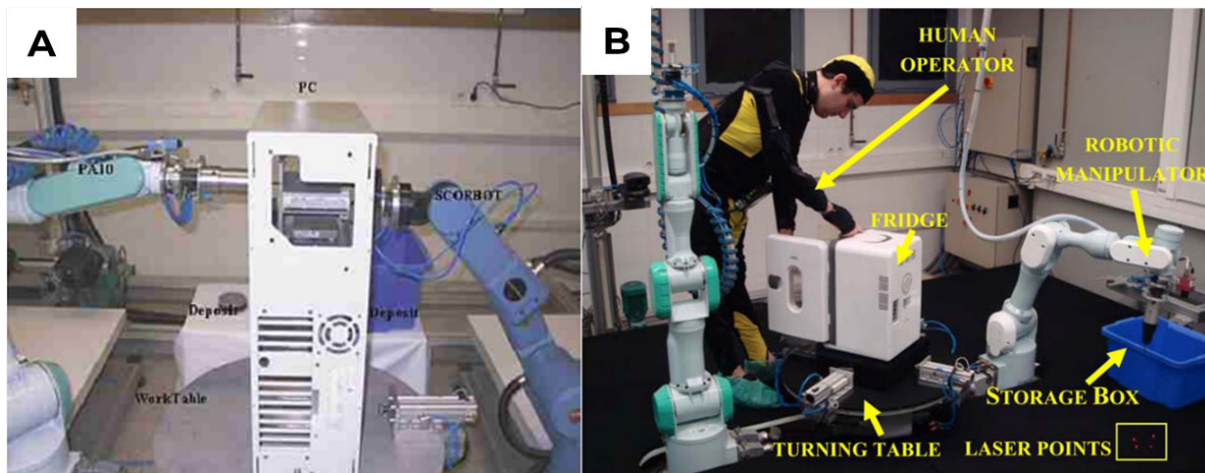


Abbildung 2.17: Vollautomatisierter Aufbau einer PC-Demontage (A) [87] und MRK-Ausbaustufe (B) [88]

Die Gruppe um **Torres** [87–98] befasst sich mit der Entwicklung vollautomatisierter Demontageanlagen, bei denen die Kooperation zwischen mehreren Robotern im Vordergrund steht. Bereits frühe Konzeptstände nutzen ein stereometrisches Bildverarbeitungssystem [96], welches durch Sensorfusion mit den Daten eines Kraft-/Momentensensors [97] eine direkte Kooperation von mehreren Robotern an einem Bauteil ermöglicht. So wird beispielsweise die Trajektoriengeneration der beiden Roboter synchronisiert, um komplexe Aufgaben, wie das Ausfädeln einer Schraube aus einer Nut, sicher durchzuführen [94]. Ein entwickelter Task-Planer generiert automatisch Pfade und Trajektorien, basierend auf einem Produktgraphen [90]. Entscheidungsbaum-Algorithmen werden dabei zur Optimierung der Planung eingesetzt [87]. Als Input für die Produktdaten der Demontageplanung dient das CAD-Modell des Produktes, aus welchem unter anderem durch Simulation valide Demontagestrategien (Kollisionsvermeidung) abgeleitet werden [93]. Im Prozess steht dabei immer die zerstörungsfreie Demontage im Vordergrund [89]. Der Fokus der Forschungsgruppe liegt auf der Demontage von WEEE-Komponenten (vgl. Abbildung 2.17, A), nicht zuletzt wegen der häufig vertikalen Fügeverbindungen und Produktstrukturen [91]. Ein Werkzeugwechselsystem erlaubt darüber hinaus die Anpassung der Endeffektoren beider Roboter für die jeweilige Demontageaufgabe und trägt damit zu einer deutlichen Erhöhung der Systemflexibilität bei. Die Erweiterung des Konzeptes um eine MRK-Ausbaustufe (siehe Abbildung 2.17, B) zur Parallelisierung menschlicher und automatisierter Arbeitsschritte an komplexen Produkten stellt den letzten Ausbaustand des Projektes dar [88]. Grundlage dafür ist die Erweiterung des Task-Planers des Multi-Roboter-Setups um die Möglichkeit menschlicher Operationen [98], die bei der Aufgabenverteilung berücksichtigt werden, allerdings zuerst noch keine Synchronisierung oder Überwachung der Ausführung erlauben.

Das Verständnis der Roboter als intelligente Agenten für die Assistenz der menschlichen Arbeitskräfte ist eine wichtige Grundlage für Folgearbeiten. Einschränkungen zeigen sich auch hier dadurch, dass die Anlagenkonzepte jeweils ausschließlich mit bekannten Produkttypen funktionieren, für die eine nahezu vollständige Datenlage durch das digitale Modell vorhanden sein muss. Lernfunktionen zur autonomen Erweiterung der Wissensbasis sind nicht vorgesehen. Eine Verbesserung für den Einsatz bei komplexen Produkten stellt die Erweiterung auf MRK dar, da sie die Parallelisierung von Arbeitsabläufen bei gleichzeitiger Zuordnung der Aufgaben entsprechend der Stärken des Roboters oder des Menschen erlaubt. Multi-Roboter-Systeme beschleunigen die Demontageoperationen maßgeblich und können so einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung des Gesamtprozesses leisten.

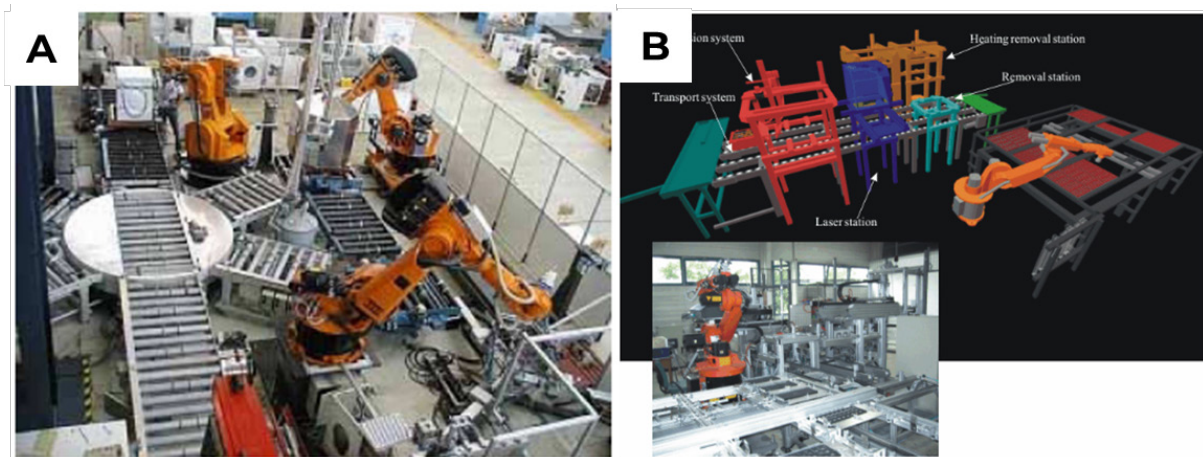


Abbildung 2.18: Anlage der FG Seliger (A) [99] und der FG Kopacek (B) [66]

Die Berliner Forschungsgruppe um **Seliger** [34, 99–101] befasst sich mit der Entwicklung automatisierter Demontageanlagen unter dem Aspekt eines möglichen industriellen Einsatzes (z. B. der Demontage von Waschmaschinen, siehe Abbildung 2.18, A). Zellkonzepte, bei denen der Fokus auf einem möglichst hohen Durchsatz bekannter Produkte liegt, werden hier im Kontext einer Lebenszyklus-orientierten Sichtweise betrachtet [34]. Dafür wird zum einen eine modulare Kontrollarchitektur entwickelt [100], als auch eine Testsystematik zur Festlegung des Produktzustandes unter dem Zielaspekt einer möglichst hohen Wiederverwendungs- bzw. Aufbereitungsquote im Bereich von LCD-Bildschirmen [101]. Mit der Absicht zukünftig Demontagefabriken gestalten zu können wird ein Sequenzplanungsprozess gestaltet, der automatisch unterschiedliche Prozesse und Werkzeuge differenzieren kann [99]. Der Begriff der *hybriden Demontage* für ein Anlagenkonzept in dem sowohl Roboter als auch menschliche Arbeitskräfte zerstörende und zerstörungsfreie Tätigkeiten ausführen wird dabei geprägt.

Die teilautomatisierte Demontage von WEEE-Gütern² ist Gegenstand der Forschungsgruppe um **Kopacek** [66, 102–107] der Universität Wien. Die entwickelte Demontagezelle weist dabei bereits die typischen Merkmale modularisierter Zellarchitekturen, so wie Bildverarbeitungs- und Sensorikmodule und eine intelligente Steuerung auf [102]. Die Zuordnung der standardisierten Abläufe erfolgt dabei über eine Erkennung der jeweiligen Variante [66]. Die Weiterentwicklung hin zu einer flexibel für unterschiedliche Produkttypen einsetzbaren Anlage kann mit Hilfe der Gliederung in sog. *Demontagefamilien* und der Einführung mobiler Roboterkonzepte sowie den bei zahlreichen Folgeprojekten eingesetzten Multi-Agenten-Systemen erreicht werden [104]. Bei einer Demontagefamilie handelt es sich um eine Gruppe unterschiedlicher, aber ähnlicher Produkte, die alle einen sehr ähnlichen Demontageprozess in der gleichen Konfiguration der modularen Anlage durchlaufen können. In neueren Untersuchungen steht auch hier der Aspekt der Wiederverwendung sowie die Perspektive der effizienteren Rückgewinnung kritischer Rohstoffe im Vordergrund [103]. Die Schlüsselrolle einer gemeinsamen Ontologie bei der Verknüpfung der Systembestandteile zum Informationsaustausch stellt ebenfalls einen wichtigen Aspekt aus diesen Arbeiten dar [106]. Ein Demonstrator für das Konzept eines mobilen Demontageroboters auf Grundlage der Multi-Agenten-Architektur ließ sich im Labormaßstab realisieren [105, 107].

Eine stark von diesen Arbeiten beeinflusste erste Anwendung im industriellen Maßstab durch einen OEM stellt der Smartphone-Demontageroboter *Liam* (siehe Abbildung 2.19, A) und dessen Weiterentwicklung *Daisy* der *Apple Inc.* dar [108]. Die Anlage demontiert bis zu 200 Telefone pro Stunde bei der Möglichkeit für 15 verschiedene Modelle, allerdings sind aufgrund der hohen Preise für Altgeräte im

² WEEE = **W**aste of **E**lectrical and **E**lectronic **E**quipment

Gebrauchtmärkte die Abgabekonditionen des stofflichen Recycling derart defizitär, dass praktisch kein Recycling im industriellen Maßstab stattfindet [109]. Ein weiteres Problem der Anlage ist die Inflexibilität: Es ist nur möglich Telefone zu demontieren, die äußerlich unbeschädigt sind. Gleichzeitig resultiert die Modellflexibilität nicht aus einer adaptiven Architektur, sondern aus dem Vorhandensein unterschiedlicher, spezifischer Module, was den Investitionsaufwand weiter erhöht.

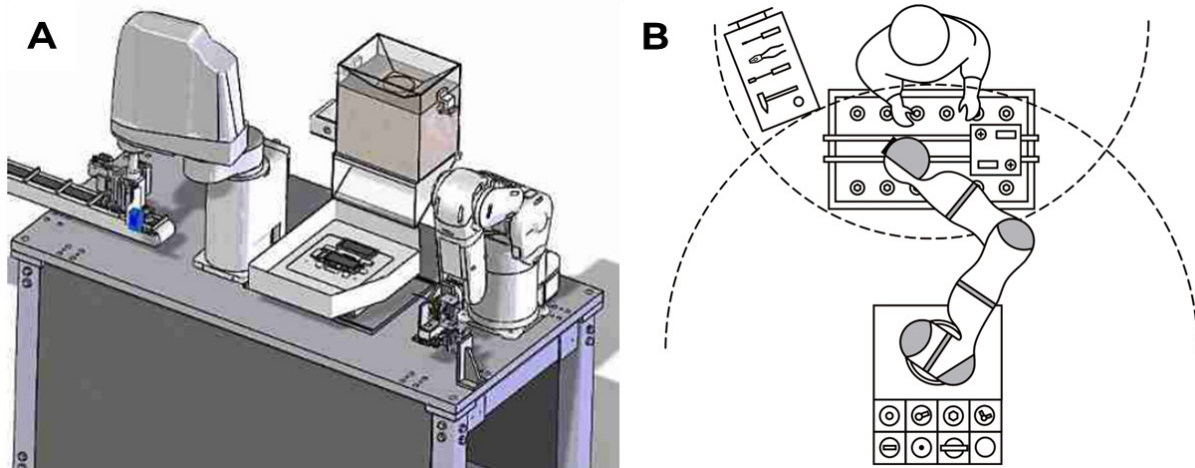


Abbildung 2.19: Smartphone-Demontageroboter "Liam" (A) [108] und MRK-Batteriedemontage (B) [110]

Ein Konzept für eine hybride Demontage von Elektro-Traktionsbatterien entstand im Rahmen des Projektes *LithoRec II* [111]. Der Grundgedanke dieser Arbeiten lag in der Vermeidung einer intensiven Nutzung von Bildverarbeitungstechnologien und des zwingenden Bedarfs umfassender Produktdaten wie in anderen Forschungsansätzen üblich [110]. Um diese Einschränkungen zu bewältigen wird ein MRK-System entwickelt, in dem der menschliche Arbeiter durch direktes Anlernen der notwendigen Schritte den Roboter für verschiedene repetitive Aufgaben im Demontageprozess nutzt (siehe Abbildung 2.19, B). Mit Hilfe dieses Ansatzes können ungelernte Arbeitskräfte in kurzer Zeit assistierte Arbeitsabläufe gestalten und umsetzen [110]. In einer weiteren Entwicklungsstufe wurde darüber hinaus eine kamerabasierte Positionserkennung der Schrauben eingeführt, um die Prozesszeiten zu verbessern [112]. Genauigkeit und Effizienz der Anlage waren jedoch weiterhin nicht industrietauglich.

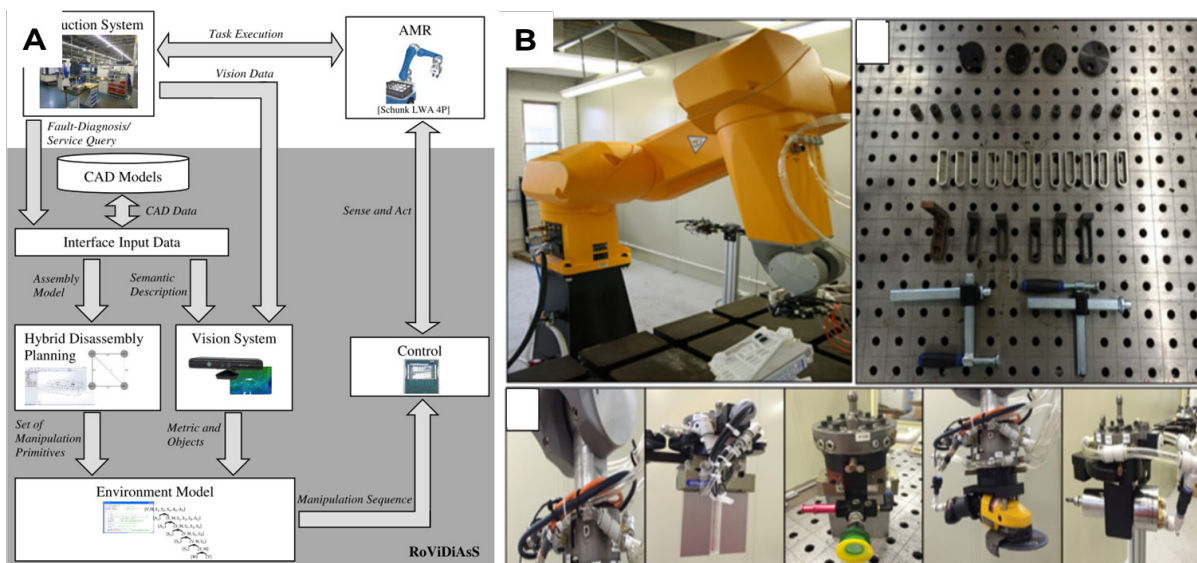


Abbildung 2.20: Systemarchitektur RoViDiAsS (A) [113] und Demontageanlage nach Li et al. (B) [114]

Mit dem *RoViDiAsS*-System (*Robotic Visual Disassembly and Assembly System*) der Universität Stuttgart wurde ein mobiler Roboterassistent entwickelt, der hauptsächlich für den Einsatz im Rahmen von Instandhaltungsoperationen und der damit verbundenen De- und Remontage eingesetzt wird (siehe Abbildung 2.20, A) [113]. Die modulare Architektur und der Einsatz von Bildverarbeitungssystemen sowie der Ableitung von Produktstrukturen aus CAD-Daten ermöglichen dabei den flexiblen Einsatz, vorausgesetzt die Produktdaten stehen zur Verfügung. Der modulare Aufbau erlaubt dabei die Erweiterung durch neue Systemkomponenten sowie die Implementierung neuer Funktionalitäten durch die Anpassung der verwendeten Algorithmen.

Ein flexibles, teil- bis vollautomatisiertes System für die Demontage und das Recycling von Elektrofahrzeug-Komponenten stammt von der Forschungsgruppe um Li [114–116]. Hervorgehend aus der Suche nach Strategien für ein profitables Recycling unter dem Aspekt von strategisch wichtigen Metallen, seltenen Erden oder Bauteilen mit hoher Wertkonzentration wurde ein Framework zur Definition von selektiven Demontageaufgaben unter unterschiedlichen Zielvorgaben entwickelt [114]. Die eigentliche Demontage wird dabei in drei Evolutionsstufen aufgeteilt: 1. Manuelle, zerstörungsfreie Demontage zum Verständnis der Produktstruktur und zur Festlegung einer validen Demontagestrategie; 2. Automatisierte Demontage via Roboter auf Grundlage der entwickelten Strategie; 3. Validierung und Optimierung der Automatisierungsprozesse. Hierbei sind aufgrund der empirischen Vorgehensweise in Schritt 1 und der Optimierung der robotergestützten Abläufe in Schritt 3 Automatisierungsstrategien für Produkte ohne das Vorhandensein der vollständigen Produktdaten ableitbar. Der Aufwand für diese Vorgehensweise, die neben fachlicher Kompetenz der Mitarbeitenden in der manuellen Demontage auch eine große Menge modularer Werkzeuge (siehe Abbildung 2.20, B) erfordert, ist als sehr hoch zu bewerten. Die Autoren merken die unzureichende Verfügbarkeit benötigter Produktinformationen für eine Automatisierung trotz vorhandener Systeme wie IDIS³ und IMDS⁴ an, im Automobilbereich von den OEM zur Verfügung gestellten Datenbanken für die EoL-Behandlung [115]. Die Optimierung des Demontageprozesses zur wirtschaftlichen Rechtfertigung der Investitions- und Betriebskosten einer robotergestützten Demontagezelle hängt von zahlreichen Kriterien ab. Die Kombination einer Kosten-Nutzen-Rechnung, eines vereinfachten LCA zur Bewertung der ökologischen Einflüsse und eine Bewertung des erforderlichen Technologieaufwands werden in einem Entscheidungsprozess abgewogen und bestimmen die Demontageeignung [116]. Diese Vorgehensweise zur Bestimmung einer zielgerichteten Demontagetiefe kann unnötige Schritte vermeiden und so die Gesamtwirtschaftlichkeit erhöhen. Die festgelegten Kriterien sind hierbei für einen Produkttyp statisch und nicht auf das individuelle Bauteil ausgerichtet. Sie erfordern überdies Informationen zu Produkt und Prozess, die im Vorfeld ermittelt werden müssen. Die Bewertung bezieht sich überdies nicht auf einzelne Demontageschritte, sondern auf unterschiedliche Verwertungsszenarios.

Neben den in diesem Kapitel bislang im Detail vorgestellten Projekten existieren noch weitere Forschungsarbeiten, die sich mit der Automatisierung von Demontageoperationen durch den Einsatz von Robotik beschäftigen. Da diese Arbeiten allerdings entweder älter sind und nicht mehr zeitgemäße Technologien verwenden oder die Hauptaspekte der Arbeiten sowie die identifizierten Forschungslücken durch die bereits vorgestellten Arbeiten abgedeckt sind, sollen diese hier keine weitere Erwähnung finden. Eine detaillierte Übersicht aller Arbeiten aus dem Themengebiet kann in [73] nachvollzogen werden. Dort finden sich überdies Arbeiten aus dem Bereich der automatisierten Sequenzplanung, die ebenfalls als Grundlage für Robotiksysteme in der Demontage eingesetzt werden können.

³ IDIS = **I**nternational **D**ismantling **I**nformation **S**ystem

⁴ IMDS = **I**nternational **M**aterial **D**ata **S**ystem

Die beschriebenen Konzepte stellen den aktuellen Stand der Robotik in der Demontage dar. Es zeigt sich, dass es neben dem Ansatz der Gestaltung möglichst autonomer, vollautomatisierter Systeme auch die Strömung der MRK-basierten Assistenzkonzepte gibt. Demontage verlangt in ihren komplexen Abläufen immer ein starkes Maß an Wahrnehmungs- und Abstraktionsfähigkeit, die aktuell durch menschliche Arbeitskräfte wesentlich einfacher realisiert werden kann. Eine Verknüpfung dieser Strömungen wird mit dem verstärkten Aufkommen von kognitiven Systemen im Rahmen der dynamischen Entwicklungen im Bereich der KI-Technologie genutzt, um eine höhere Flexibilität und Effizienz der Systeme erreichen zu können.

Zusammengefasst ergeben sich aus dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der robotergestützten Demontageanlagen folgende Problemstellungen für eine Umsetzung flexibler, automatisierter Systeme im industriellen Maßstab:

- Alle bisherigen Systeme sind stark von den von OEM zur Verfügung gestellten Produktdaten, insbesondere CAD-Dateien, der zu demontierenden Produkte abhängig
- Die Zustände der individuellen Produkte werden nicht in Entscheidungen über den Verwertungsweg einbezogen
- Eine Erfassung der Zustände erfolgt ausschließlich sensorisch, ohne Berücksichtigung von Lifecycle-Daten
- Alle Systemkonzepte wurden ausschließlich für spezifische Produkte entwickelt, es gibt keine generalisierten Methoden die anhand von Anlagen validiert wurden (nur im Bereich der DSP)
- Die zuverlässige Erkennung von kleineren Objekten, insbesondere Verbindern im Rahmen der Bildverarbeitung stellt nach wie vor ein Problem in praktischen Versuchsumgebungen dar
- Es ist weiterhin erforderlich, modulare Werkzeugsysteme für die zerstörungsfreie oder teilweise zerstörende Demontage mit Hilfe eines Roboters zu entwickeln
- Anlagen mit Wissensdatenbank haben keine Verknüpfung zu einem übergeordneten Gesamtsystem und sind nicht in der Lage eine gemeinsame Wissensbasis mit anderen Maschinen, beispielsweise im Verbund einer Demontagefabrik, zu bilden
- Es gibt keine standardisierte Ontologie zur Verknüpfung von Produkt- und Prozesswissen unter einer gemeinsamen Syntax
- Lernfähigkeit der Systeme und Adaption auf unbekannte Produktvarianten sind bislang nur sehr eingeschränkt oder durch Teaching eines Mitarbeiters möglich
- Eine Verbesserung der Planungsautonomie und Effizienz ist erforderlich, um Demontageprozesse hinsichtlich von Taktzeiterfordernissen wirtschaftlich effektiv auszulegen
- Im Bereich der teilautomatisierten Demontage in MRK-Anlagen ist eine Verbesserung der Sicherheitseinrichtungen, z. B. durch synchronisierte Bewegungsüberwachung erforderlich
- Eine multidimensionale Entscheidungsinstanz zur Optimierung der Demontageplanung aufgrund wirtschaftlicher, ökologischer und technischer Bedingungen kann die Effizienz weiter verbessern
- Je höher die Systemautonomie desto größer werden die (meist zentralisierten) Rechnerkapazitäten und Datenströme, die für die Realisierung der Systeme erforderlich sind

Anhand der vorgestellten Konzepte kann begründet dargelegt werden, dass der Einsatz von Industrierobotern zur Automatisierung ein vielversprechendes Potenzial zur Effizienzsteigerung von Demontageprozessen darstellt. Zur erfolgreichen Gestaltung und Umsetzung der Konzepte bedarf es allerdings neben dem ausführenden Manipulator bzw. Werkzeugsystem auch umfassender sensorischer und informationstechnischer Systeme.

2.4 Robot Cognition: Machine Learning and Reasoning

Können Maschinen denken? – Diese Frage stellte *Allan Turing* bereits 1950 und formulierte damit die Grundfrage der künstlichen Intelligenz (KI), einer bis heute aktuellen interdisziplinären Forschungsrichtung zwischen Natur-, Computer- und Ingenieurwissenschaften. In seinem *Imitation Game* [117] (Dt. *Turing-Test*) soll die Beantwortung dieser Frage durch eine Prüfung in der direkten Interaktion zwischen Mensch und Maschine durchgeführt werden: In einer Versuchsanordnung mit einem menschlichen Fragesteller wird ohne Sicht- und Hörkontakt mittels schriftlicher Kommunikation eine Unterhaltung mit zwei Gesprächspartnern, einem Menschen und einer Maschine, geführt. Kann der Fragesteller nach einer Befragung der beiden Gesprächspartner nicht sagen, wer von beiden die Maschine ist, so gilt der Turing-Test als bestanden. Im Sinne einer Generalisierung des intelligenten Systemverhaltens ist es also die Fähigkeit menschliches Verhalten in einer unbekannten Situation zu emulieren, die das Hauptkriterium der klassischen künstlichen Intelligenz bildet.

Auch nach modernen Maßstäben kann bei einer positiven Imitation nach Turing von einem intelligenten System gesprochen werden. Die Betrachtung von intelligenten Robotersystemen bezieht sich daher üblicherweise auf die Betriebsphase, d. h. auf das aktive *Verhalten*, der Anlagen. Im Sinne der *Weisheit* aus der Verständnishierarchie nach *Ackoff* [24] (siehe 2.1) spielt in den meisten industriellen Abläufen die *Erfahrung* der Mitarbeiter eine entscheidende Rolle [118]. Diese Erfahrung macht auch aus der physischen Tätigkeit der Mitarbeiter *Wissensarbeit* und damit einen wesentlichen Baustein für eine erfolgreiche Emulation durch ein intelligentes System aus. Der Unterschied zwischen einer deterministischen Automatisierung und einem intelligenten Systemverhalten lässt sich hier in vier Stufen gliedern (siehe Abbildung 2.21) [119]. Die Stufe der Kommunikation und verteilten Funktionalität ist die Basis für die horizontale und vertikale Informationsintegration. Adaptivität und Autonomie des Systems werden als synchrone, selbstständige Konfiguration und Regelung aufgrund von Prozessparametern innerhalb der Laufzeit verstanden. Kontextsensitive, kognitive Maschinensysteme erweitern das intelligente Verhalten um die Berücksichtigung von dynamischen Situationen und Umgebungseinflüssen sowie einer Form von Wissensrepräsentation (und damit der Voraussetzung für Lernfähigkeit). Die Spitze bilden selbst-optimierende Systeme, die in der Lage sind eigenständig Zielvorgaben im Kontext einer integrierten Wertschöpfungskette festzulegen und Prozessschritte zu optimieren.



Abbildung 2.21: Stufen des intelligenten Verhaltens von Maschinensystemen nach [119]

Kognitive Robotiksysteme sind der dritten Stufe dieser Hierarchie zuzuordnen, können allerdings auch mit Hilfe einer übergeordneten Informationsmanagement-Strategie mit einem gesamtheitlichen Wertschöpfungskettenmanagement verknüpft werden. Ein selbstoptimierendes System müsste allerdings zur sinnvollen Festlegung von Zielen für die einzelne (Demontage-)Anlage über eine koordinierende Steuerungsinstanz verfügen, um ein solches Szenario anwendungsbezogen umzusetzen.

Im Bereich der menschenzentrierten Robotersysteme haben sich zwei Hauptansätze herausdifferenziert: Zum einen gibt es Konzepte, in denen die kognitiven Aufgaben in erster Line den Menschen überlassen und die Roboter allein als Assistenzsysteme zur physischen Entlastung der Mitarbeiter betrachtet werden, zum anderen gibt es die Strömung, in der dem Roboter möglichst viele Fähigkeiten gegeben werden, um auch komplexe Kognitionsaufgaben selbstständig umzusetzen [120]. Diese Robotersysteme werden der kognitiven Robotik (*Robot Cognition*) zugerechnet und schließen Wahrnehmungsaufgaben, Navigation, Kommunikation, Situationsbewusstsein und Entscheidungs- sowie Lernfähigkeiten ein.

Bei der kognitiven Robotik geht es nach *Levesque et al.* [121] um Wissensrepräsentation und Schlussfolgern durch einen autonomen Roboter (oder Agenten) in einer dynamischen und nicht vollständig bekannten Umgebung. In diesen wissensbasierten Systemen ist es vor allem die Wechselwirkung zwischen Wissen, Wahrnehmung und den daraus folgenden Handlungen des Roboters, die durch das gezielte Schlussfolgern einer *high-level* Kontrollinstanz koordiniert werden müssen. Allgemein wird zwischen drei Steuerungsebenen unterschieden: *low-level*, *mid-level* und *high-level* [77]. In der *high-level*-Ebene werden die tatsächlichen, prozessübergreifenden kognitiven Methoden sowie das Wissensmanagement vorgehalten. Die *mid-level*-Ebene koordiniert die abstrakten Anweisungen aus der Kognitionsebene gegenüber der operativen *low-level*-Ebene und stellt damit die zentrale, algorithmische Steuerung aufgabenspezifischer Systemmodule dar (z. B. des Wahrnehmungssystems). Die *low-level*-Ebene umfasst die Sensoren und Aktoren und damit die Erhebung von Rohdaten sowie die Umwandlung von Prozessanweisungen in maschinenlesbare Signale.

Eine zentrale Frage ist dabei das Verhältnis zwischen notwendigen externen Informationen und wahrnehmbaren Informationen, damit das System fähig ist angemessen zu handeln, wobei der Fokus auf der Methodik und nicht auf der Aufgabe an sich liegt. Autonome, kognitive Roboter sind intelligente Systeme mit einem spezifischen Grad von Autonomie in der Ausführung von Aufgabenstellungen ohne oder mit minimaler Unterstützung durch Menschen [50]. Die kognitiven Funktionen der Wahrnehmung, des Schlussfolgerns und der Fähigkeit Wissen kontextbezogen zu speichern (Erfahrung) stellen die Hauptelemente dieser Systeme dar. Die Interaktion mit Sensoren und Aktoren ermöglicht die Reaktion auf die Umwelt – sei es im Rahmen einer Mensch-Maschine Interaktion oder als reines Prozessregelsystem. Die klassische KI ohne Wahrnehmung ist oft nicht ausreichend für reale Prozesse, sodass der Einsatz kognitiver Systemarchitekturen zur Ermöglichung von Autonomie erforderlich ist. In der Demontage und anderen realen Problemen ist beispielsweise das Zusammenspiel aus Wahrnehmung, Gewandtheit und Intelligenz ein grundlegender Vorteil menschlicher Arbeitskräfte, um diese Probleme effektiv zu lösen [76]. Klassische KI ist überwiegend für komplexe Aufgaben in nicht komplexen Systemen, kognitive Systeme für einfache Aufgaben in komplexen Systemen relevant, *Artificial Cognitive Systems* können beide Anforderungen durch gezielte Anwendung der jeweiligen Methoden bedienen [122]. Im Bereich der Demontage trifft dies insbesondere auf Wahrnehmung, Sequenzplanung, Entscheidungen bezüglich der Demontagetiefe und Pfadplanung, vor allem in Verbindung mit MRK, zu.

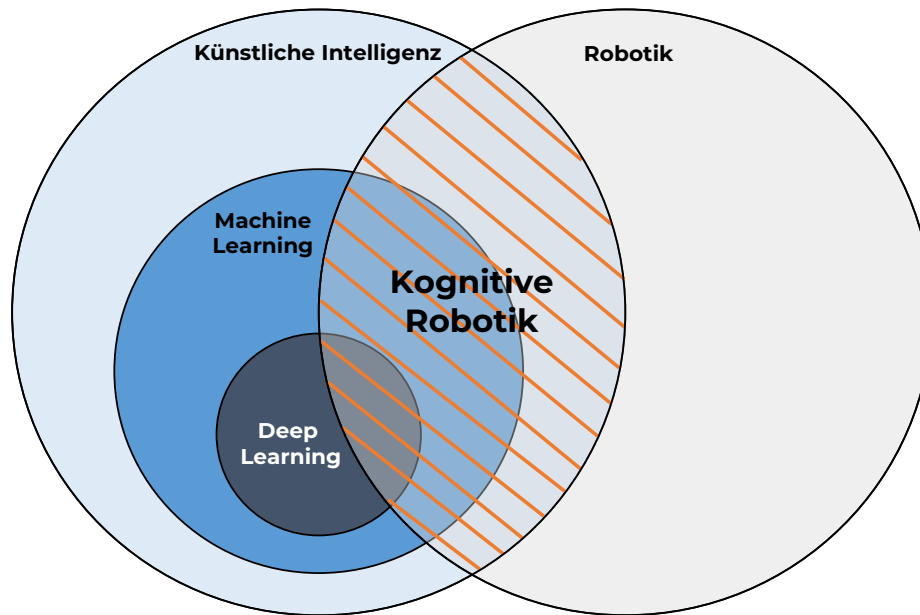


Abbildung 2.22: Einordnung der kognitiven Robotik als Schnittmenge zwischen Robotik und KI

Bei der Verortung der kognitiven Robotik als interdisziplinäres Forschungsfeld, handelt es sich dabei sowohl um ein Subgebiet der KI als auch ein Subgebiet der Robotik (siehe Abbildung 2.22). Da in Abschnitt 2.3 bereits eine umfassende Einführung von Seiten der Robotik gegeben wurde und es sich bei den Methoden der kognitiven Robotik primär um wissens- und schlussfolgerungsbasierte Abläufe handelt, die in Bezug auf die verwendeten Techniken vorrangig dem Bereich KI zuzuordnen sind, werden im Folgenden die dafür relevanten Aspekte näher erläutert.

Unter der *KI* wird, wie oben bereits erwähnt, das Feld der Computerwissenschaften verstanden, welches sich mit der Frage beschäftigt, ob Maschinen fähig seien intellektuelle Aufgaben, die normalerweise einem Menschen zuzuordnen wären, selbstständig auszuführen. Ein großer Teil der KI befasst sich dabei mit Ansätzen, die auf der Anwendung logischer Regeln basieren. Diese Ansätze, zu denen auch weite Teile der kognitiven Robotik gehören, werden als *symbolische KI* bezeichnet [123]. Bei unscharfen (Engl. *fuzzy*) Problemstellungen, welche häufig in realen Anwendungen auftreten und zahlreichen externen Einflüssen ausgesetzt sind, geraten diese *Expertensysteme* allerdings an ihre Grenzen – es ist nicht mehr zu handhaben, alle möglichen Fälle in Form expliziter Regeln abzubilden. Der Bereich neben der symbolischen KI umfasst daher Methoden, bei denen keine expliziten Regeln für das Systemverhalten vorgegeben werden, sondern das System diese selbstständig erlernt. Dieses Feld, das durch ein nicht explizit programmiertes Systemverhalten gekennzeichnet ist, wird als *Machine Learning* (ML) bezeichnet und ist durch drei elementare Faktoren gekennzeichnet [124]:

- Daten der Situation als Grundlage, welche vom Programm eingelesen werden.
- Eine Metrik zur Quantifizierung der Abweichung zwischen dem aktuellen und einem idealen Systemverhalten.
- Einen Feedback-Mechanismus, der das Ergebnis auf Grundlage der Differenz optimiert, also „Regeln“ annähert (*Training*).

ML befasst sich also damit, bedeutsame Repräsentationen bezüglich der Aufgabenstellung in den zur Verfügung stehenden Daten zu finden. Beim *Deep Learning* (DL) handelt es sich um eine Unterdisziplin des ML, bei der diese Repräsentationen mit Hilfe von neuronalen Netzen (NN) und leistungsfähigen Rechnern in einer sehr großen vertikalen Hierarchie, also Modelltiefe, abgebildet werden [123].

Im Rahmen des Trainings von ML-Modellen werden drei unterschiedliche Trainingsarten unterschieden [124]:

- **Unüberwachtes Lernen** (Engl. *unsupervised learning*): Die Menge an Trainingsbeispielen besteht nur aus Eingabemustern. Das ML-Modell muss so selbst versuchen, Ähnlichkeiten herauszufinden und Klassen zu differenzieren. Ein Beispiel für unüberwachtes Lernen ist das *Clustering*. Das ML-Modell erkennt dabei unterschiedliche Klassen, ohne diese jedoch explizit einer Benennung zuzuordnen [124].
- **Überwachtes Lernen** (Engl. *supervised learning*): Das Training wird zusätzlich zu den Eingabemustern mit einer bereits korrekt klassifizierten Referenzmenge an Ausgabemustern trainiert (Engl. *true-positives*). Auf diese Weise kann die Ist-Ausgabe mit der Referenz-Ausgabe verglichen werden und die Modellparameter können so verändert werden, dass sich das Modellverhalten in Richtung einer generalisierten Repräsentation entwickeln kann. Das Modell ist so in der Lage auch unbekannte Beispiele korrekt zuzuordnen. Beispiele für den Einsatz von überwachtem Lernen sind vor allem Objekterkennung, Bildsegmentierung, Syntaxvorhersage und Sequenzgenerierung [123].
- **Bestärkendes Lernen** (Engl. *reinforcement learning*): Das Training im Rahmen des bestärkenden Lernens gibt pro Trainingsdurchlauf einen diskreten (Wahrheits-)Wert zurück und somit Anhaltspunkte zur richtigen Entwicklung. Dieser „Belohnungs-“ oder „Bestrafungswert“ ist damit eine Reaktion auf das Systemverhalten in einer spezifischen Umgebung. Realisiert wird dieses Verhalten mit Hilfe einer maximierenden Anreiz-oder Belohnungsfunktion [125].

Konkrete Techniken und Methoden zur Anwendung von ML sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Die Auswahl einer geeigneten Technik hängt stark von den verfügbaren Daten sowie von der zu lösenden Fragestellung ab. Im „*No Free Lunch*“-Theorem (NFL) [126] wurde für diese Problematik bereits 1997 eine systematische Beschreibung veröffentlicht. Demnach ist ein Algorithmus, der sich für eine bestimmte Problemklasse sehr leistungsfähig zeigt, bei anderen Problemklassen weniger leistungsfähig. Es gibt also keine Technik, die für alle Probleme optimal geeignet ist.

Tabelle 2.2: Übersicht zu den wichtigsten ML-Techniken nach [124]

ML-Technik	Funktionsweise	Einsatzbeispiele
Lineare Modelle (z. B. Regression)	Lineare Modelle werden auf lineare Zusammenhänge oder mit Hilfe mathematischer Transformation linearisierte Funktionen angewendet. Das häufigste Modell ist hierbei die <i>lineare Regression</i> oder bei generalisierten Ansätzen die <i>logistische Regression</i> . Bei der linearen Regression wird der Output als die Summe des Inputs multipliziert mit spezifischen Gewichtungsfaktoren zuzüglich eines Offset-Wertes beschrieben. Diese Parameter werden beim Training des Modells bestimmt.	Einfache Klassifizierungs und Unterscheidungsaufgaben sowie Prognosen. Keine Beschränkung in der Dimensionalität solange die Zusammenhänge linear sind.
Perzeptronen und neuronale Netze	Bei den bereits 1958 entwickelten Perzeptronen handelt es sich um den Versuch der Mathematisierung biologischer Wahrnehmungs- und Denkprozesse [127]. Mehrlagige Perzeptronen stellen prinzipiell universelle Funktionsapproximatoren dar und können jegliche Beziehungen abbilden [128]. Ein	Abbildung nahezu beliebiger Zusammenhänge aus Input und Output. Verwendung zur Klassifizierung und

	<p>einzelnes Perzeptron wird auch als <i>Neuron</i> bezeichnet. Werden mehrere Neuronen verknüpft, spricht man von einem <i>neuronalen Netz</i> (NN). Mathematisch handelt es sich in der einfachsten Form um ein Vektorprodukt, das den Outputvektor durch die Multiplikation des Inputvektors mit einem Gewichtungsvektor berechnet. Der Gewichtungsvektor wird für jedes Neuron anhand einer bekannten Menge Trainingsdaten bestimmt.</p>	<p>vorhersage in vielen Bereichen, mit dem Unterbereich <i>Deep Learning</i> führend im Bereich der Bilderkennung.</p>
Entscheidungs-bäume	<p>Entscheidungsbäume können im Unterschied zu numerischen Ansätzen direkte kategorische Inputdaten, z. B. Wörter verarbeiten. Es handelt sich dabei um heuristische Strukturmodelle, die als Aneinanderreihung von Entscheidungspunkten verstanden werden können. Die dabei entstehende Struktur ähnelt in ihrer Morphologie den Verästelungen eines Baumes, woraus sich der Name herleitet. Welche Fragen innerhalb dieses Baumes an welcher Stelle gefragt werden, wird mit Hilfe der Trainingsdaten ermittelt. Sog. <i>Ensemble-Modelle</i> parallelisieren das Konzept der Entscheidungsbäume und stellen heute in Form der <i>Random-Forest</i> und <i>Gradient-Boosting Machines</i> eine der wichtigsten Techniken im Bereich der Klassifizierung dar.</p>	<p>Klassifizierungs- und Regressionsaufgaben. Keine Einschränkungen bezüglich der Art der funktionalen Zusammenhänge (linear und nicht-linear). Gute Interpretierbarkeit der Funktionsweise.</p>
Support Vector Machines (SVM)	<p>SVM (Dt. <i>Stützvektormethode</i>, Begriff ungebräuchlich) sind primär für binäre Klassifizierungsaufgaben entwickelt wurden. Es handelt sich um eine Technik, bei der die unterschiedlichen Klassen mit Hilfe möglichst wenige Datenpunkten, den sog. Stützvektoren, differenziert werden. Ziel ist die Berechnung der klassentrennenden Hyperebene. Die Anwendung von Kernelfunktionen ermöglicht die Verwendung bei nichtlinearen Zusammenhängen. Komplexe mathematische Zusammenhänge und Hyperparameter erschweren das Training dieser Modelle.</p>	<p>Binäre- und Mehrklassen-Klassifizierung. Bieten eine sehr hohe Genauigkeit und einen hohen Grad an Generalisierung.</p>
Probabilistische Modelle	<p>Neben den algebraischen Methoden basieren die probabilistischen Modelle auf Wahrscheinlichkeit. Der <i>Satz von Bayes</i> oder die <i>Maximum-Likelihood-Methode</i> (MLE) stellen wichtige Beispiele für probabilistische Modelle dar. Hierbei werden keine direkten Aussagen als Ergebnisse des Modells abgeleitet, sondern lediglich Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte Ereignisse. Trainingsdaten stellen Wissen dar, welches die Verlässlichkeit der Aussagen signifikant</p>	<p>Statistische Vorhersagemodelle</p>

	verbessern kann. Wichtig für die Anwendung dieser Methoden ist die Berücksichtigung der statistischen Verteilungsform der Ausgangsdaten.	
Evolutionäre Algorithmen	<i>Evolutionäre Algorithmen</i> (EA) bilden auf mathematische Weise das Verhalten von Vererbung und Mutation nach Grundlage der biologischen Evolutionstheorie ab. Der Ablauf der EA-Optimierung verläuft überwacht nach einer Strategie der maximalen Exploration, womit sich sehr große Lösungsräume modellieren lassen. Durch zufällige Veränderungen erhöht sich die Chance, bei der Optimierung ein globales Minimum zu finden. Wichtige Beispiele für EA sind <i>genetische Algorithmen</i> und <i>künstliche Ameisenkolonien</i> .	Wegstecken-Optimierung (<i>Traveling-Salesman-Problem</i>), globale Optimierungs-Algorithmen, Sequenzbestimmung.
Dynamische Programmierung	Das bereits 1957 von <i>Bellman</i> [129] postulierte <i>Dynamic Programming</i> (DP) beschreibt mehrstufige Transitionsprozesse, ausgehend von einem Initialzustand innerhalb eines dynamischen Systems. Wenn ein Ziel- und ein Anfangszustand bekannt sind, können in einem Trainingsvorgang die notwendigen Aktionen des Systems bestimmt werden. Um den optimalen Pfad der Zustandsänderung zu bestimmen, wird eine Wertfunktion eingeführt (<i>Bellman-Funktion</i>).	Bestimmung von Zustandsänderungen, Optimierung von Zustandsveränderungen. Expertensysteme fallen ebenfalls unter die DP.
Bestärkendes Lernen	Bestärkendes Lernen wird ohne Trainingsdaten anhand von Feedback aus der Systemumgebung trainiert. Es wird hier als eigene Methodik vorgestellt, da sich die Funktionsweise mit Hilfe einer definierten Belohnungsfunktion in einer direkten Situation zu lernen fundamental von allen anderen Vorgehensweisen unterscheidet. Bestärkendes Lernen kommt den natürlichen Lernprozessen eines Menschen am nächsten. Es stellt heute den wichtigsten Ansatz für autonom lernende Systeme dar. Wichtige Beispiele sind das <i>Q-Learning</i> und <i>Monte-Carlo</i> Algorithmen.	Erlernen eines spezifischen Systemverhaltens anhand von Feedback in einer realen Umgebung mit Hilfe einer Belohnungsfunktion.
Zeitreihenanalyse	Alle bisherigen Methoden basieren auf statischen Eingangsdaten bzw. auf Punkten innerhalb eines dynamischen Systems. Kontinuierliche Zeitreihenanalyse, z. B. mit Hilfe von <i>Hidden-Markov-Modellen</i> (HMM) ermöglicht die Verarbeitung von Datenströmen wie Audio-/Video-Signalen oder Wetterdaten. Jeder Zustand steht dabei in Abhängigkeit zum vorherigen, Vorhersagen erfolgen probabilistisch.	Echtzeitsysteme, z. B. Spracherkennung, meteorologische Systeme.

Die Grundlage für den Einsatz dieser Techniken in Robotersystemen und anderen Anwendungen bilden Daten, idealerweise in Form einer standardisierten, übergeordneten Wissensbasis. Um eine solche zu realisieren ist ein allgemeines Verständnis von Wissen und Informationen in Bezug auf die Daten für alle Systemteilnehmer erforderlich. Man spricht hier von einer *Ontologie*, einem Begriff aus der Philosophie, der ursprünglich die *Lehre vom Seienden* bezeichnet [130]. Im Kontext der Informatik wird unter Ontologie ein semiotisches Verständnismodell verstanden [131]. Diese Ontologien bestehen vorwiegend aus präskriptiven Festlegungen und Beschreibungen, wie eine informationstechnische *Welt* beschaffen sein sollte [130]. Um diese Beschreibung präzise und allgemein gültig zu formulieren, ist das Verhältnis zwischen den Begriffen und Gegenständen festzulegen (siehe Abbildung 2.23).

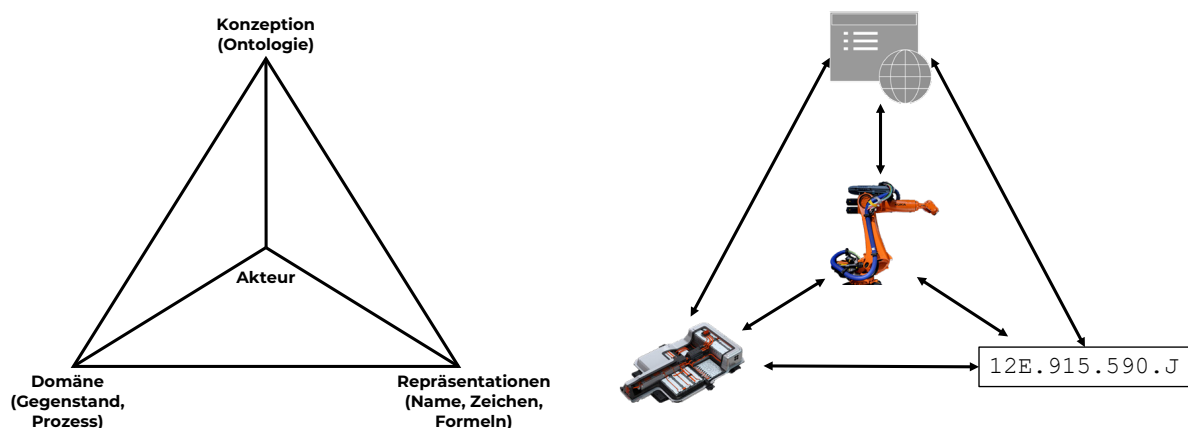


Abbildung 2.23: Semiotisches Tetraeder der Ontologie nach [131] und Systemelemente der Recycling 4.0 Domäne

Der reale Gegenstand oder Prozess, auf den sich das Informationsmodell bezieht wird als *Domäne* bezeichnet. Diese Domäne wird durch *Repräsentationen* (Name, Zeichen, Formeln, Datenträger) erfasst und einem standardisierten Begriffsmodell zugeordnet. Die Begriffe und *Konzeptionen* und deren Struktur, die in diesen Repräsentationen für die jeweiligen Objekte oder Prozesse enthalten sind, stellen die eigentliche Ontologie nach dem Verständnis der modernen Informatik dar [130]. Man kann also von standardisiertem, strukturierten Wissen über einen Gegenstand oder einen Prozess innerhalb eines informationstechnischen Systems sprechen. An der zentralen Position innerhalb dieses Systems befindet sich der *Akteur*, der die Objekte und Prozesse anhand der Repräsentationen erkennt, gemäß ihrer Ontologie interpretiert und mit ihnen agiert. Es ist wichtig, dass alle partizipierenden Akteure einer informationstechnischen Welt die gleiche Konzeption, d. h. Ontologie, kennen und im Kontext befolgen [132]. Im Bereich der Industrie 4.0 sind gemeinsame Ontologien vor allem bei verteilten, cyberphysischen Systemen bedeutend, um z. B. die autonome Zusammenarbeit der Maschinen zu ermöglichen (Prozessontologie) oder um Produktcharakteristika übergreifend darzustellen [119].

Bei *Olszewska et al.* [133] findet sich die erste übergreifende Entwicklung eines Ontologie-Standards für autonome Roboter aus einer IEEE-Arbeitsgruppe heraus. Die hier vorgeschlagene Ontologie ist spezifisch für die autonome Robotik und daher primär prozessorientiert. In einer Umgebung mit der größten Variantenvielfalt auf Seiten der Produkte, wie der Demontage, ist sie nicht als generalisierbare Lösung anwendbar. Im Bereich der Demontage setzen *Koppensteiner et al.* [105] auf die Standardisierung der Wissensbasis für ein System mobiler Roboter durch ein ontologisches Welt-Modell. Eine domänenspezifische Sprache für reversible Montageprozesse und damit thematisch verwandt mit der Demontage zeigen *Schultz et al.* [134]. Die Integration eines prozessspezifischen *Design for Disassembly* aus der Montageplanung heraus durch die Bereitstellung von Strukturinformationen, die eine Demontage als

reversiblen Montageplan zulassen, bilden das Kernelement dieses Ansatzes. Ein ontologischer Standard im Bereich roboterbasierter Automatisierungssysteme ermöglicht neben einer durchgängigen Zusammenarbeit auch die Weitergabe und das Lernen eines Systems von einem anderen. Eine Kombination von Wissen unterschiedlicher Systeme zu neuem Wissen ist somit ebenfalls möglich [135].

Eine Hauptaufgabe bei der Synthese von Wissen aus vorhandenen Informationen ist das Schlussfolgern. Kognitive Robotersysteme wenden neben den oben beschriebenen Methoden der KI bzw. des ML auch das logische Schlussfolgern (Engl. *Reasoning*) auf Grundlage der bestehenden Wissensrepräsentationen an. Eine Möglichkeit logische Prozesse in kognitiven Robotersystemen zu modellieren stellt der *Situation Calculus* dar [136]. Grundlegende Elemente sind hier *situations* (Situationen, Systemzustände), *actions* (Aktionen) und *fluents* (situationsabhängige Funktionen, die die Auswirkung von Aktionen auf den Systemzustand beschreiben). Es gibt relationale fluent-Funktionen, die einen Wahrheitswert (wahr/falsch) repräsentieren und funktionale fluent-Funktionen, die einen reellen Wertebereich annehmen können. Die Beschreibung der Zustandsänderungen erfolgt in Form von logischen Sätzen der ersten Ordnung⁵:

$$\begin{aligned} Pickingup(x, t, do(a, s)) \equiv & \exists t'(a = startPickup(x, t') \wedge t' \leq t) \vee \\ & Pickingup(x, t, s) \wedge \neg \exists t'(a = endPickup(x, t') \wedge t' \leq t). \end{aligned}$$

Dieser Satz aus [121] beschreibt die Aktion des Aufhebens (*Picking-up*) als definierte Funktion, abhängig vom Roboter (x), der Zeit (t) und einer fluent-Funktion (do), wiederum abhängig von der Aktion (a) und dem Systemzustand (s). Die Funktion wird in zwei *unmittelbare* (t') Aktionen (Start und Ende der Handlung) sowie eine neue fluent-Funktion aufgeteilt und ist damit vollständig beschrieben. Für zahlreiche Anwendungen in realen Umgebungen ist eine Beschreibung nach dem klassischen Situation Calculus allerdings nicht ausreichend, weshalb es auch differenzierte Erweiterungen gibt, die anwendungsbezogen zum Einsatz kommen können [122]. Hier sind neben den aktiven Aktionen, die eine Änderung des Systemzustandes zur Folge haben auch sensorische Aktionen, die den Zustand nicht verändern, aber Informationen zum Zustand des Systems gewinnen, von großer Bedeutung [121]. Eine fundamentale Annahme für die meisten Logiksysteme ist die eines bekannten Anfangszustandes (s_0) in einer geschlossenen Welt⁶. Da diese s_0 -Hypothese in realen Szenarien, so auch in Demontagesystemen, nicht ohne weiteres angenommen werden kann, ist die Gewinnung von Informationen über den Ausgangszustand durch den Einsatz von Sensorik erforderlich. Die gewonnenen Informationen können zu einer *lokal-vollständigen* Annahme des Ausgangszustandes beitragen und so den Einsatz von Schlussfolgerungen ermöglichen [121]. Eine Alternative dazu stellen umfangreiche Datenbanksysteme dar, die einen Zugriff des Robotersystems auf lokal-vollständiges Wissen erlauben.

Es gibt also unterschiedliche Aufgabenbereiche, die für verschiedene Anforderungen bedient werden müssen. Somit ist es nicht möglich, alle spezifischen Prozessschritte und Algorithmen in einem einzelnen Steuerungsmodul abzubilden. Unterschiedliche Systemebenen, wie in Abbildung 2.24 dargestellt, helfen die erforderlichen Aufgaben zwischen den technischen Systembestandteilen aufzuteilen. Als Lösung dieser Einschränkung werden die Systemarchitekturen kognitiver Anlagen als agentenbasierte Systeme ausgelegt.

⁵ In der *Prädikatenlogik* wird zwischen Sätzen erster und zweiter Ordnung unterschieden [137]. Sätze erster Ordnung erlauben das rein syntaktische Schlussfolgern, ohne direkte Relationen zu (mathematischen) Bedeutungen zu definieren. Um Aussagen auf ihren Wahrheitswert hin zu untersuchen, ist die begriffliche Verknüpfung mit der Semantik einer Sprache zulässig (*Abbildungen*). Die Prädikatenlogik der zweiten Stufe befasst sich zusätzlich mit der Quantifizierung über alle Relationsvariablen. Logische Sätze seien im Folgenden **blau** hervorgehoben.

⁶ In einer *geschlossenen* Welt kann sich die Situation (s) nur durch eine Aktion (a_n) eines Agenten (x_n) verändern.

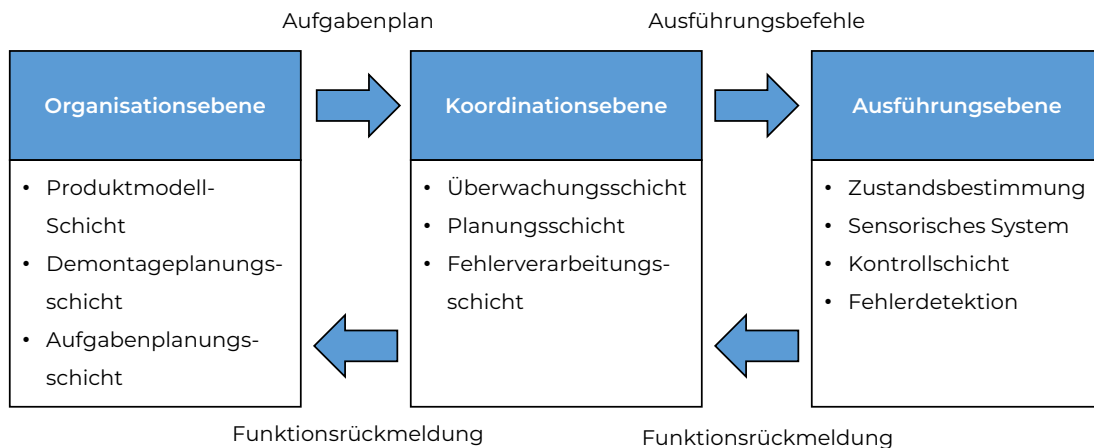


Abbildung 2.24: Allgemeiner Aufbau eines intelligenten Demontagesystems nach Aufgabenbereichen [138]

Unter einem *Agenten* (von Lat. *agere* = tun) wird nach einer allgemeinen Definition von *Russell und Norvig* [139] eine Entität verstanden, die ihre Umgebung mit Sensoren wahrnimmt und durch Aktuatoren mit dieser interagiert. In einem wissensbasierten System kann es sich dabei sowohl um Menschen, als auch um Computerprogramme und Geräte handeln [140]. Die Fähigkeit, auf Grundlage der Wissensbasis und der Wahrnehmung autonom⁷ Schlussfolgerungen zu ziehen sowie eine Zustandsbestimmung der Umwelt nachzuvollziehen, ist dabei die Voraussetzung für die Umsetzung einer Zielsetzung im jeweiligen Einsatzszenario. Bei einem *Roboteragenten* handelt es sich daher um eine high-level Kontrollinstanz (s. o.), die in der Lage ist, ein Repräsentationsmodell der Umgebung und der Aufgabe des Roboters abzubilden sowie intelligentes Verhalten auf Grundlage von Wissen und Schlussfolgerungen zu ermöglichen [142]. Das in Abbildung 2.25, (A) dargestellte, allgemeine Funktionsprinzip eines Agenten enthält einen *Prozessor*, der in Form eines *Programms* die *Funktion* des Agenten verarbeitet. Damit bestimmt werden kann, ob ein Agent richtig handelt, muss das Ergebnis dieser Verarbeitung ausgewertet werden (Engl. *performance measure*). Ein *rationaler Agent* muss folglich für jeden Zeitpunkt der Wahrnehmungssequenz eine Handlung bestimmen, die diese Auswertung maximiert [139]. Das heißt nicht, dass der Agent das exakte Ergebnis der Auswirkung seiner Handlungen auf die Umwelt kennt – die Sammlung von Informationen und ein Lernverhalten in Bezug auf die Umgebung in Abhängigkeit von der Zeit und den Veränderungen der Zustände können ein ideales Verhalten nur näherungsweise beschreiben. Es existieren hierfür unterschiedliche Agenten-Strukturen, beispielsweise die modell- und zielbasierten Agenten (siehe Abbildung 2.25, (B)), welche in vielen Robotik-Lösungen, oft mit einer zusätzlichen Lernfähigkeit versehen, verwendet werden.

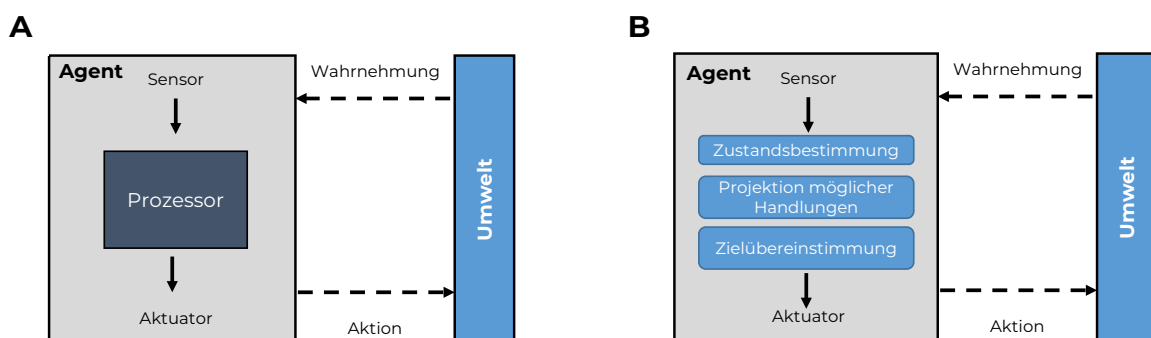


Abbildung 2.25: Aufbau von Agentensystemen: (A) allgemeiner Agent; (B) modell- und zielbasierter Agent; nach [139]

⁷ Autonomie im Sinne einer Entscheidungsfähigkeit ohne äußere Beeinflussung nach [141].

Werden mehrere Agenten in einem Umweltsystem eingesetzt, spricht man von einem *Multi-Agenten-System* (MAS). MAS sind Beispiele einer verteilten KI, bei der die Koordination der Informationsflüsse auf unterschiedlichen Ebenen zu erfolgen hat (z. B. Informationen *innerhalb* und *zwischen* den Agenten) [141]. Die Agenten in einem MAS müssen sich immer gegenseitig berücksichtigen, entweder in einem kooperativen oder einem kompetitiven Verhältnis, abhängig von den jeweiligen Optimierungskriterien der Handlungsauswertung. Entscheidend hierfür ist die jeweilige exakte Beschreibung des Aufgabenfelds. Die Klassifizierung eines Agenten kann nach der PEAS-Methodik⁸ erfolgen [139]. Hier werden für den Agenten die Zielgrößen der Leistungsmessung, die Umweltbedingungen, die sensorisch erfassbaren Wahrnehmungseindrücke sowie die durch Aktuatoren umsetzbaren Handlungen beschrieben. Die Charakteristik der Dimensionen dieser Größen kann dialektisch anhand der Wahrnehmbarkeit, des Systemverhaltens (deterministisch oder stochastisch), des Zeitverhaltens (sequentiell oder episodisch) sowie des Umgebungsverhaltens (statische oder dynamische Veränderung, diskrete oder kontinuierliche Zustände, bekannte oder unbekannte Verhaltensregeln) abgebildet werden [139].

Die Einsatz- und Leistungsfähigkeit eines Agenten hängt maßgeblich von dessen Komponenten und der Gesamtarchitektur ab [141]. Strukturbezogen können Agenten als Summe aus ihrer Architektur und dem Programm, also der Implementierung der Funktion gesehen werden [139]. Ein vereinfachtes Beispiel für eine Funktionsimplementierung eines Agenten ist in Tabelle 2.3 für einen Demontageroboter dargestellt.

Tabelle 2.3: Funktionsimplementierung eines Agenten als Programm im Pseudocode nach [139]

```
function DEMONTAGE-AGENT([location, status]) returns an action
    if status = EoL then return Disassemble
    else if location = A then return Right
    else if location = B then return Left
```

Agentenbasierte Systeme werden in Industriebereichen vor allem zur Steuerung von Produktionssystemen eingesetzt [143]. Die Entwicklung solcher Systeme folgt den Methoden des Software-Engineering und erfordert meist ein klares Rollenmodell der einzelnen Agenten (Verantwortlichkeit, Befugnisse, Aktivitäten, Protokolle). Zahlreiche Beispiele von (Multi-)Agentensystemen in der Produktion finden sich bei *Shen et al.* [144]. Wichtige Einsatzbereiche sind hier: Kapselung von Systemen, Organisation, Koordination, System Dynamics, Optimierung, Sicherheit, Werkzeuge und Standards. Eine durchgängige Integration von der übergeordneten Organisationsebene bis hin zur Echtzeit-Ausführungsebene ist dort bislang nicht in Produktivsystemen implementiert.

Eine zentrale Voraussetzung für die Funktion eines Agenten (vgl. Abbildung 2.25) stellt die Wahrnehmung dar. Sensoren messen dabei die Veränderung physikalischer Größen in technischen Systemen [68]. Neben zahlreichen Vorrichtungen zur Messung einzelner Größen, wie beispielsweise von Kräften, Momenten und Temperaturen stellt die Bildverarbeitungstechnik die wichtigste und aufwendigste Form der Wahrnehmungstechnologien dar. Im Gegensatz zu alternativen Identifikationsstrategien (z. B. Barcode, RFID, Data-Matrix Code [145]) erlaubt die Bildverarbeitungstechnologie eine Erkennung von Objekten ohne diesen vorher einen Datenträger zur Identifikation zu integrieren und ist damit ohne produktbezogene Kosten flexibel einsetzbar. Für die Aufnahme von Bildern kommt dabei Sensorik zum Einsatz, die das einfallende Lichtsignal in ein elektronisches Signal umwandeln. In Abbildung 2.26 werden der Bildverarbeitungsprozess und die Verarbeitungskette dieser Signale dargestellt.

⁸ Engl. Akronym: *Performance Measure, Environment, Actuators, Sensors*

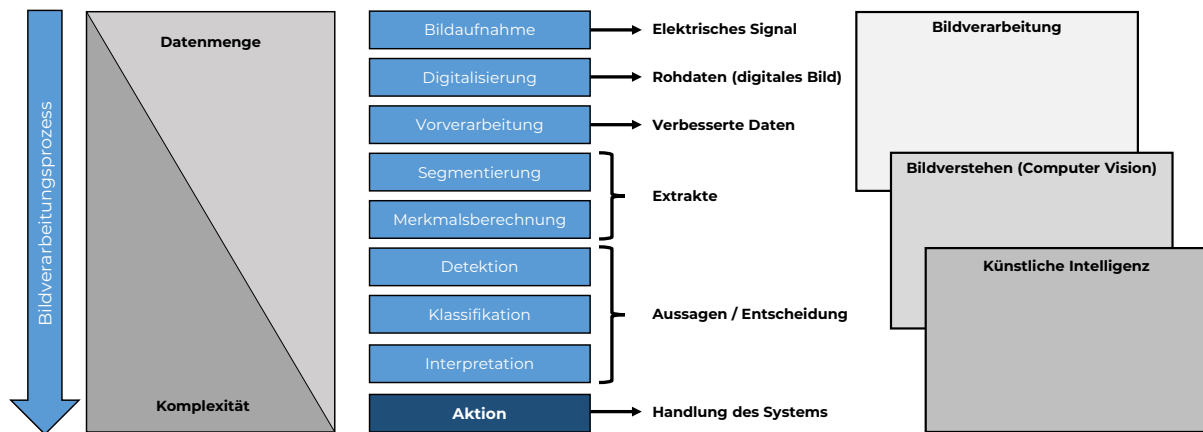


Abbildung 2.26: Bildverarbeitungsprozess und Verarbeitungskette nach [146]

Die Umwandlung dieses Signals zu einem digitalen Bild wird als eigentlicher Bildverarbeitungsprozess bezeichnet. Aus diesem Bild heraus werden beim Bildverstehen Merkmale extrahiert und es können bereits Aussagen getroffen werden. Diese Schritte fallen unter den Oberbegriff der klassischen *Computer Vision* (CV). Über diese Techniken hinaus wird auch im Bereich der Bildverarbeitung mit KI gearbeitet. Eine scharfe Trennung zwischen „klassischer“ CV und KI ist umstritten [147]. Die höchste Stufe gemäß der in Abbildung 2.26 dargestellten Hierarchie ist die Ableitung von Aussagen bzw. Entscheidungen auf Grundlage von aus den Informationen gewonnenem Wissen. Die Aktion des Agentensystems innerhalb seiner Umwelt hängt von diesen Aussagen ab.

Ein großer Fortschritt im Bereich CV stellt der Einsatz von DL-Methoden, insbesondere *faltenden neuronalen Netzen* (Engl. *Convolutional Neural Network*, CNN) dar [123]. Im Unterschied zu klassischen Perceptron-Netzwerken sind CNN in der Lage die Eingangsdaten direkt in Form mehrdimensionaler Matrizen (3D-Tensoren) zu verarbeiten, was für Bilddaten in der Form *Höhe*Breite*Farbkanäle* vorteilhaft ist, um beispielsweise eine ortsunabhängige Identifikation von Objekten im Bildbereich zu erlernen. Ein stetiger Fortschritt in der Verbesserung der zu Grunde liegenden Algorithmen und Netzarchitekturen erhöht die Genauigkeit dieser Technologien laufend (vgl. [148]). Im Kontext dieser Arbeit beschränkt sich das Verständnis auf die Anwendung dieser Methoden, nicht auf die Entwicklung neuer Netzarchitekturen und Algorithmen zur Bildverarbeitung. Ein für die Demontageaufgabe wichtiges Problem ist die Erkennung kleiner Objekte, beispielsweise von Verbindungselementen, in großen Bildern. Diese Problemstellung ist technisch sehr komplex und noch nicht vollständig gelöst [149]. Es gibt hier einige Ansätze (z. B. [150]) auf die in Abschnitt 4.3.2 näher eingegangen wird. Der überwiegende Anteil der bestehenden Vision-Systeme am Markt verwendet klassische Verfahren der CV und keine DL-Erkennung. Der Nachteil dieser Methoden gegenüber DL liegt in der Fähigkeit von KI-Ansätzen wie der Verwendung von CNN, die Bildererkennung flexibel auf bislang unbekannte Objekte zu trainieren, ohne explizit die notwendigen Merkmale vorzugeben [123]. Dies eröffnet im Bereich der Demontage vor allem im Kontext der hohen Varianten- und Zustandsvielfalt verbesserte Einsatzmöglichkeiten, da der Einrichtungs- und Rekonfigurationsaufwand von Bildverarbeitungssystemen drastisch reduziert werden kann.

Die Wichtigkeit von Wahrnehmungseigenschaften in kognitiven Robotiksystemen zeigt sich vor allem dann, wenn mehrere Sensoren kombiniert werden müssen, um eine Aufgabenstellung zu lösen. Am Beispiel der Demontage von Schraubenverbindungen im Bereich WEEE zeigen *DiFilippo et al.* [151], dass die Verknüpfung von Bilddaten und Kraftsensoren eine Möglichkeit liefert, die Zuverlässigkeit bei der Lokalisierung der Schraubenköpfe mit Hilfe des Demontagewerkzeuges zu steigern. Nach einer groben

Ortung der Schrauben mit Hilfe der Kameradaten erfolgt ein Antasten des Roboters, wobei über einen Kraft-/Momentensensor festgestellt werden kann, wann der Schrauber die Schraube sicher erfasst hat. Eine Verknüpfung dieser multisensorischen Ansätze mit KI-Techniken und logischen Algorithmen erlaubt darüber hinaus die Implementierung angemessener Kontaktstrategien in Bezug auf den Umgang mit Menschen und Gegenständen [152]. Wahrnehmung spielt daher insbesondere im MRK-Bereich eine wichtige Rolle. Eine optimierte Echtzeit-Bahnplanung (vgl. [153]) kann beispielsweise die Vermeidung von Kollisionen mit Hindernissen und Personen bei gleichzeitiger Aktualisierung der Ausführungsdiagnostik zur Umsetzung der Arbeitsaufgabe ermöglichen. Fortschrittliche Systeme sind darüber hinaus in der Lage auf Basis von Wahrnehmungsinformationen Prozesswissen zu extrahieren und das Erlernte dann in neuen Umgebungen anzuwenden [154]. Diese wahrnehmungsbasierten Lernstrategien für neue Arbeitsprozesse finden sich auch bereits im Bereich der Demontage [79] wieder. Gerade in derartigen dynamischen und adaptiven Systemen spielt eine übergreifende Ontologie zudem eine Schlüsselrolle (vgl. [155]).

Neben der Akquise von Informationen ist das Treffen von Entscheidungen im Rahmen der Funktionsprozesse von Agentensystemen ein zentrales Element. Die *Entscheidungstheorie* liefert als eigenständige Subdisziplin der Wirtschaftswissenschaften einen theoretischen Hintergrund, der auch Schnittstellen zu wissenschaftlichen Disziplinen wie KI oder kognitiven Systemen bietet. Unter den Begriff der *Entscheidung* fallen im wissenschaftlichen Kontext alle Auswahlprozesse zwischen mehreren Handlungsalternativen [156]. Ein Agent trifft Entscheidungen auf Grundlage seines Wissens zu Umgebung und festgelegten Zielen [139]. Dabei ist die Zielprojektion als qualitative Bewertungsgrundlage für Entscheidungen nicht immer monetär. Gerade im Umfeld der Kreislaufwirtschaft spielt die Nachhaltigkeit als Zieldimension eine wichtige Rolle. Für die Bundesrepublik Deutschland wurden diese Nachhaltigkeitsziele in drei Dimensionen definiert: ökologisch, ökonomisch und sozial (sog. *Nachhaltigkeitsdreieck*) [157]. Die Umsetzung dieser Zielvorgaben erscheint somit auch im Kontext der Demontage angebracht, zumal hier bislang in keinem Fall alle Dimensionen aktiv berücksichtigt wurden. Entscheidungstheoretische Untersuchungen im Bereich der agentenbasierten Systeme sind dabei immer *präskriptiv*, d. h. es sollen nicht die tatsächlichen Prozesse erklärt werden, sondern es soll gezeigt werden, wie rationale Entscheidungen getroffen werden könnten (Ratschläge, Empfehlungen, siehe Abbildung 2.27) [156].

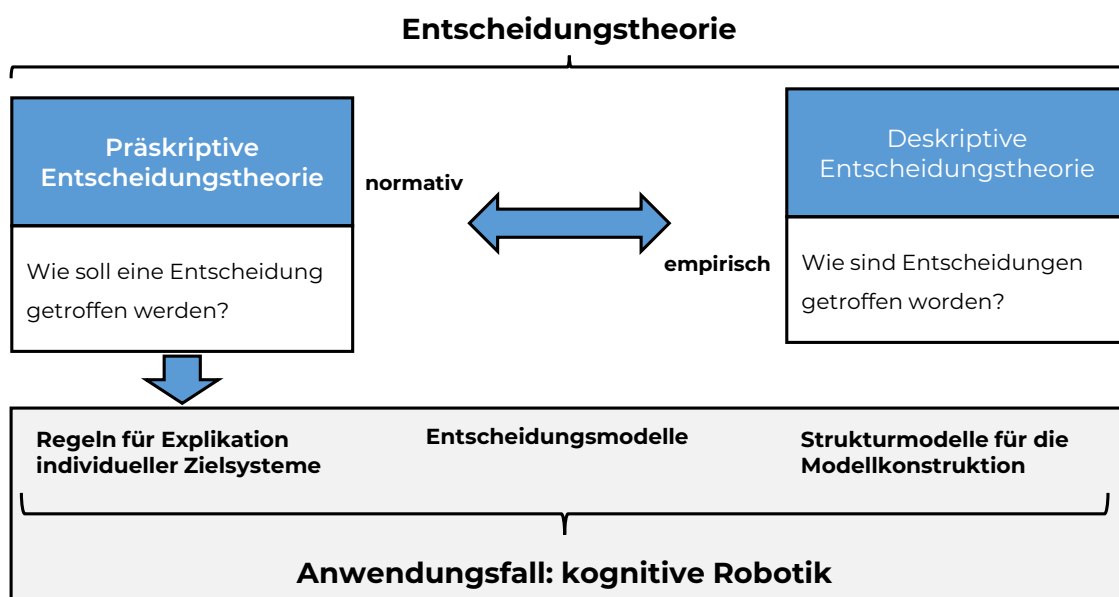


Abbildung 2.27: Kognitive Robotik als Anwendungsfall der Entscheidungstheorie (vgl. [156])

Im Bereich der Planung und Optimierung von Demontageprozessen wird die Entscheidungstheorie angewandt, um einen optimalen Demontagegrad oder Demontagesequenz zu finden. Demontageoperationen bestehen aus zahlreichen Entscheidungen, die während des Prozesses getroffen werden müssen. Ein System zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen in Demontagesystemen zeigen *Colledani und Battia* [158]. Der Zustand der EoL-Produkte stellt einen der Hauptgründe für Prozessunsicherheiten in der Demontage dar. Die entwickelte Methodik setzt darin an, diese Unsicherheit durch die Optimierung der Demontagetiefe und die Berücksichtigung unterschiedlicher Entscheidungsergebnisse bei der Gestaltung von automatisierten Demontagelinien zu verbessern. Dazu werden charakteristische Schlüsselgrößen definiert, anhand denen eine vergleichbare Abschätzung der Zustände ermöglicht wird. Diese Zustände werden durch Qualitätsklassen repräsentiert. Der Entscheidungsprozess basiert auf einer Funktion zur Optimierung des Profits, also der ökonomischen Dimension. Die Bestimmung der Qualitätsgrößen findet vor der eigentlichen Demontage statt, wobei die Autoren anregen, eine kontinuierliche Bestimmung der Produktzustände zu implementieren, um die Ergebnisse weiter zu verbessern. Ein ähnliches Prinzip der profitorientierten Optimierung findet sich bereits bei *Duta et al.* [159]. Hier werden zur Verbesserung der erzielbaren Gewinne genetische Algorithmen für einen optimierten Ausgleich der Auslastung mehrerer Demontagelinien eingesetzt, um Nebenzeiten zu minimieren und den Gesamtprozess effizienter ablaufen zu lassen. Einen umfassenderen Ansatz, ausgehend von einem kreislaufwirtschaftlichen Gesamtsystem, lässt sich bei *Cong et al.* [160] finden. Die Entwicklung einer EoL-Verwertungsstrategie auf Grundlage einer Demontagematrix führt zu einer Verbesserung der DSP, dem Demontagegrad sowie der Entscheidung über nachgelagerte Prozessschritte. Ein wichtiger Ansatz ist hier die Annahme, dass der erzielbare Gewinn nicht zwangsläufig mit einer zerstörungsfreien, funktionserhaltenden Demontage steigt, sondern in bestimmten Fällen ein zerstörendes Trennverfahren in Vorbereitung des stofflichen Recyclings eine bessere Perspektive bietet. Die Entscheidung erfolgt über den vollständig beschriebenen Vergleich der Optionen in Form einer diskreten Kosten-Nutzen-Betrachtung auf Basis einer vollständig darstellbaren Demontagematrix. Die Autoren der Studie schlagen ferner eine weitere Untersuchung in Bezug auf automatisierte Anlagen vor, da sich der Forschungsgegenstand nur auf manuelle Prozesse erstreckt. Dieses Verfahren erfordert überdies ein nahezu vollständiges Produkt- und Prozesswissen, wovon in der Praxis jedoch selten ausgegangen werden kann. *Feng et al.* [161] hingegen zeigen, dass vor allem die Wiederverwendbarkeit der Komponenten bei einer schrittweisen Entscheidung in hybriden Demontageprozessen eine Schlüsselrolle spielt. Unter der Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Ziele wird zwischen den EoL-Verwertungsmöglichkeiten differenziert und eine reine Profitoptimierung zu Gunsten einer Minimierung der Umwelteinflüsse beschränkt. Die Aufwendungen der Demontage werden dabei über den DEI-Score berechnet (vgl. 2.2) und es wird zwischen den Optionen *Reuse*, *Recycle* (inkl. *Recover*) und *Landfill* entschieden. Die Einführung einer produktspezifischen Fehlerkennzahl über eine mögliche Ausfallwahrscheinlichkeit bei der Weiterverwendung ist das Hauptkriterium für eine diesbezügliche Entscheidung, basierend auf einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die gegeben sein muss. Diese Fehlerkennzahl hat wiederum einen starken Einfluss auf die Bewertung der ökologischen Prozesskennzahl, sowie die Umwelteinflüsse durch nachgelagerte Prozessschritte wie z. B. Transport. Die Berechnung der Pareto-effizienten Prozessentscheidungen erfolgt mit Hilfe genetischer Algorithmen. Voraussetzung ist auch hier ein vollständiges Produkt und Prozesswissen. Die Autoren bemerken darüber hinaus, dass eine Betrachtung realistischerer Prozesse bislang nicht erfolgt ist und in diesen Umgebungen eine deutlich höhere Anzahl an Entscheidungsparametern erforderlich sein kann. Neben diesen Beispielen zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Dimensionen kann im Sinne eines Verständnisses von Robotern als Service- bzw. Assistenzsystemen auch bei Entscheidungsprozessen zu der Verteilung der Aufgaben zwischen Roboter und Mensch die soziale Zieldimension durch eine mögliche Entlastung des Mitarbeiters berücksichtigt werden [162].

Systemarchitekturen, die kognitive Robotersysteme repräsentieren, wurden bereits in Kapitel 2.3 beschrieben (vgl. [76]). Arbeiten, die ausschließlich die Sequenzplanung betrachten, sollen hier nicht näher erörtert werden, da diese Untergruppe eine eigenständige Subdisziplin der Demontageforschung darstellt, die über den Einsatz von Robotik-Lösungen hinausgeht und weitgehend unabhängig von einer tatsächlichen technischen Implementierung ist. Die Sequenz kann immer als Entscheidungsproblem im Rahmen der technisch möglichen Demontierbarkeit betrachtet werden. In diesem Sinne ist es nach Erfassung der Produktstruktur und der Abhängigkeiten eine mathematisch ermittelte Folge der Ergebnisse von binären Demontageentscheidungen abhängig von vorher definierten Zielgrößen (in der Regel unter Maßgabe der Maximierung des monetären Prozessergebnisses). Zur Lösung dieser Aufgabenstellungen haben sich genetische Algorithmen und Petri-Netze als am besten geeignet herausgestellt, da es mit Hilfe dieser möglich ist, die komplexen Verkettungen im Rahmen eines mathematischen Modells bei günstigem Ressourceneinsatz zu optimieren (vgl. [163–167]).

Künftige Aufgaben für die Entwickler kognitiver Robotersysteme sollten stärker von einem anwendungsorientierten Forschungsstandpunkt aus untersucht werden [168]. Die Demontage verknüpft diesen Anspruch an eine praxisorientierte Forschung und bietet gleichzeitig ein hoch komplexes Umfeld zur Validierung von kognitiven Robotik-Konzepten im Rahmen neuester technischer Entwicklungen. Die Berücksichtigung der strukturellen Ordnung von Komponenten in Baugruppen, d. h. eine funktionsorientierte Betrachtungsweise der Demontageobjekte, ermöglicht eine Modifizierung klassischer Sequenzplanungsansätze, um bei optimierter Effizienz einen erhöhten Prozessgewinn durch die Demontage von Baugruppen zu erzielen [169]. Der Einsatz von ML-Methoden und Optimierungsalgorithmen bei *Wang et al.* [170], *Tian et al.* [171] und *Chen et al.* [172] zeigt dabei, dass eine Optimierung in Bezug auf mehrdimensionale Zielstellungen bei einer gegebenen Wissensgrundlage möglich ist. In großen Anlagen, speziell mit mehreren Linien und mehreren Robotern pro Zelle, spiegelt die Allokation der Demontageaufgaben zwischen verschiedenen Robotern eine wichtige Aufgabe wider. Auch hier zeigen sich künstliche Ameisenkolonie-Algorithmen, eine mögliche Metaheuristik aus der Wegstreckenoptimierung, als effektive Berechnungslösungen [173]. Nicht zuletzt müssen immer auch ethische Aspekte beim Einsatz kognitiver Robotersysteme, vor allem in der direkten Zusammenarbeit mit Menschen, berücksichtigt werden (vgl. [174]).

Zusammengefasst ergeben sich für den aktuellen Stand im Bereich der kognitiven Robotik mit Bezug auf eine angewandte Forschung im Bereich der Demontage folgende Perspektiven und Herausforderungen für den gewinnbringenden Einsatz in zukünftigen Demontagekonzepten:

- Intelligente Systeme zeichnen sich durch die bestmögliche Abbildung menschlicher Fähigkeiten aus. Kognitive Robotik kann diese Form der kontextsensitiven Automatisierung für die Demontage umsetzen
- Der Einsatz kognitiver Robotikarchitekturen basiert auf einer umfangreichen Wissensbasis
- Diese Wissensbasis ist das Ergebnis eines umfangreichen Informationsmanagements
- Ein gesamtheitliches Informationsmanagement berücksichtigt eine Wissensbasis, externe Informationen und Wahrnehmungsinformationen in einer standardisierten Ontologie
- Ein selbstoptimierendes System als ideale Automatisierungsstufe ist nicht unmittelbar umzusetzen. Durch ein kontextsensitives, übergeordnetes Informationsmanagement kann auf Prozessebene ein *quasi-selbstoptimierendes* System gestaltet werden, welches die präskriptiven Zielsetzungen für die Demontage auf Grundlage der übergeordneten Kreislaufwirtschaftsprozesse quantifiziert und festlegt
- Eine selektive, produktindividuelle und zielorientierte Demontage ist profitabler als pauschale Entscheidungen auf Basis unscharfer Daten

- Eine Methodik zur Umsetzung eines solchen Systemverhaltens ist im Bereich der Demontage bislang nicht implementiert wurden
- Neben dem klassischen Ansatz der Übernahme originär menschlicher Aufgabenbereiche kann die kognitive Robotik auch als Prozessassistent eine Unterstützungsfunktion erfüllen. Der Einsatz von KI-Technologien ermöglicht hier neue Perspektiven für MRK-Konzepte (vgl. [175])
- Eine prozessorientierte Gestaltung der Steuerungsebenen von agentenbasierten Systemen ermöglicht die Implementierung von verteilten Agenten und anwendungsbezogenen Entscheidungsfunktionen. Die Agenten müssen entsprechend ihrer Funktion klassifiziert werden
- Entscheidungen in der Demontage sollten an den Nachhaltigkeitszielen orientiert in ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimensionen bewertet werden
- Eine grundlegende Herausforderung für kognitive Prozesse ist die Feststellung des produktbezogenen Ist-Zustandes für jeden Prozessschritt (S_0 -Problem)
- Umfangreiche Wahrnehmungsfunktionen sind in der Lage kontinuierlich Informationen zum Produkt und dessen Beschaffenheit zu detektieren und ermöglichen auf diese Weise die Generierung eines umfangreichen digitalen Produktmodells für EoL-Prozesse
- Der Einsatz von Multisensorsystemen erhöht dabei die Zuverlässigkeit und kann eine breite Anzahl an komplexer Prozessanwendungen auch ohne Produktwissen automatisieren
- Die optische Detektion und Identifikation kleiner Objekte, wie beispielsweise Verbindern stellt in der Bildverarbeitungstechnik nach wie vor eine Herausforderung dar
- Sequenzplanung kann als formalisierte Darstellung der Entscheidungen bezüglich der Demontage nach einer Zielgröße betrachtet werden. Die Entscheidungen bezüglich der bauteilindividuellen Verwertungsstrategie bestimmen den Demontageprozess maßgeblich

Bis Computer oder Robotersysteme zu *universellen künstlichen Intelligenzen* werden, die beliebig mit menschlichen Mitarbeitern austauschbar sind und einen Turing-Test im Gebiet der Demontage bestehen, ist noch ein enormer technischer Fortschritt notwendig. Kognitive Robotersysteme können jedoch als kontextsensitive Steuerungsanlagen Teilprozesse zuverlässig automatisieren, solange die notwendigen Informationen vorliegen. Der Zustand der Bauteile ist dabei die entscheidende Grundlage für die Auswahl einer geeigneten Verwertungsstrategie. Ein kognitives Robotiksystem muss daher in der Lage sein diese Zustände zu erfassen oder aus externen Quellen zu erschließen und zu bewerten. Aktuell sind oft wenige Features in Entscheidungsmodellen berücksichtigt, daher liefern die Algorithmen deutliche aber nicht unbedingt realistische Ergebnisse. Ansätze zur Berücksichtigung hochdimensionaler Feature-Maps erscheinen deshalb sinnvoll. Symbolische KI ist in mehrdimensionalen Merkmalsebenen oft nicht handhabbar, da die Festlegung der notwendigen Regelungen nicht mehr manuell erfolgen kann. ML-Methoden bieten hier Vorgehensweisen, bei denen das Modell diese *Regeln* selbstständig in einem Lernprozess bestimmt (z. B. DNN). Kein Algorithmus ist universell, sodass er alle Anforderungen optimal abdecken kann. Daher müssen durch zustands- und umgebungsabhängige Ziele flexible Systeme geschaffen werden, die sich kontinuierlich den Gegebenheiten anpassen. Die informationstechnische Integration der Demontageprozesse in die gesamte Kreislaufwirtschaft eröffnet dahingehend ein großes Potenzial.

3 Zwischenfazit: Perspektiven, Methodik, Forschungslücke

Im vorangehenden Kapitel wurde das Themengebiet der Demontageautomatisierung aus Sicht der wichtigsten Teilgebiete umfassend dargestellt und hinsichtlich seiner Perspektiven und Problemstellungen untersucht. Dieses Zwischenfazit soll nun im Kontext der Zielsetzung dieser Arbeit die identifizierten Aspekte rekapitulieren und entsprechend der verfolgten Methodik in der Forschungsfrage und den daraus abgeleiteten Hypothesen systematisiert darstellen. Eine kritische Betrachtung der wissenschaftstheoretischen Implikationen der aufgestellten Hypothesen, vor allem im Hinblick auf die erforderlichen Evaluationsstrategien, schließt dieses Kapitel ab.

Im interdisziplinären Forschungsfeld zwischen Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung wurde bislang nur eine geringe Anzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt [176]. Die besondere Herausforderung gegenüber der industriellen Fertigungstechnik liegt in der Verwertungstechnik vor allem in der Varianz der Produktzustände und der hohen Diversität der Produktvarianten in relativ kleinen auftretenden Losgrößen begründet. Dieses Zusammenspiel aus *komplexen* Prozessen (z. B. Demontage) und *komplizierten* Produkten stellt hohe Anforderungen an die Planung von Automatisierungssystemen für die wirtschaftliche Durchführung der erforderlichen Prozesse. Kognitive Robotik und der Einsatz von ML-Techniken bieten eine Perspektive, die hohe Anzahl an unterschiedlichen Fällen, welche in der Demontage auftreten können, zu verarbeiten, da keine manuelle Planung jedes Prozessschrittes für alle Varianten mehr erforderlich ist, sondern generalisierte Modelle für den Umgang mit einer hohen Vielfalt an möglichen Input- und Outputoptionen erstellt werden können. Auf diese Weise kann die wirtschaftliche Effizienz der Demontage deutlich gesteigert werden (vgl. [70]). In der Analyse des aktuellen technisch-wissenschaftlichen Kenntnisstandes in Kapitel 2 zeigt sich, dass derartige Systeme grundsätzlich realisierbar sind, jedoch in Bezug auf eine praktische Umsetzbarkeit noch zahlreiche Verbesserungspotenziale und zu lösende Fragestellungen beinhalten.

Zielsetzung dieser Arbeit ist daher die nachhaltige Verbesserung von Verwertungsprozessen durch eine roboterbasierte Demontage (siehe 1.1). Nachhaltigkeit wird hierbei im Sinne des multidimensionalen Verständnisses der ökonomischen, ökologischen und sozialen Zieldimensionen verstanden [157]. Die Demontage hat in den Verwertungsprozessen hinsichtlich der Prozessanforderungen die größten Gemeinsamkeiten mit der industriellen Fertigung, macht bislang jedoch aufgrund der hohen Personalkosten der überwiegend manuellen Tätigkeiten einen großen Kostenanteil im Recycling aus. Eine Automatisierung kann dahingehend die ökonomische Dimension verbessern. Basierend auf einer besseren ökonomischen Gesamtbilanz können Demontageprozesse im Vergleich zur heutigen Verbreitung für zusätzliche Produktbereiche wirtschaftlich werden. Diese weitere Verbreitung der Demontage erfüllt die ökologische Zieldimension, da durch Demontage höhere Reinheitsgrade für die Materialrückgewinnung in nachgelagerten Prozessen erzielt oder Komponenten und Baugruppen für eine höherwertige Verwertungsstufe (vgl. [11]) zurückgewonnen werden können. Darüber hinaus ist die manuelle Tätigkeit in vielen Demontagebereichen körperlich anstrengend sowie mit Sicherheits- und Gesundheitsrisiken verbunden. Der gezielte Einsatz von Robotern im Rahmen einer Automatisierungsstrategie kann also auf diese Weise auch einen Beitrag in der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit für den Demontagebereich leisten.

Um diese Zielsetzung zu erreichen, wird im Folgenden die methodische Heuristik dieses Forschungsvorhabens beschrieben (siehe Abbildung 3.1).

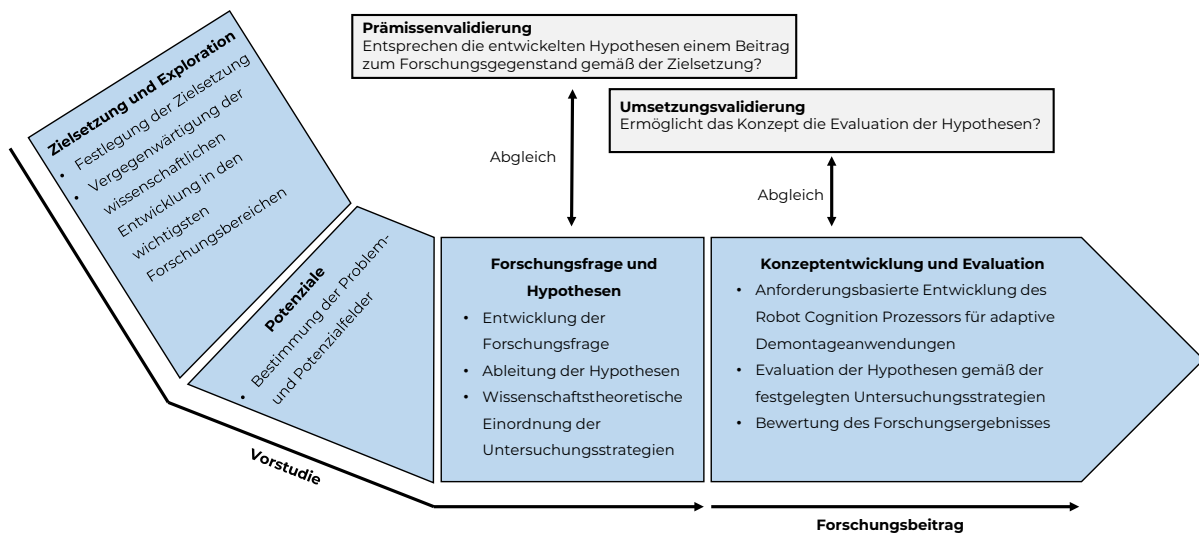


Abbildung 3.1: Heuristische Vorgehensweise zur Zielerreichung des Forschungsvorhabens

Auf Grundlage der festgelegten Motivation und Zielsetzung des Vorhabens werden in einem ersten Schritt die wissenschaftlich-technischen Grundlagen (Kapitel 2) für die betreffenden Teilgebiete untersucht. Im Rahmen dieser *Vorstudie* (vgl. auch [73] als systematische Literaturrecherche) werden die aktuellen Strömungen der Forschungsbereiche identifiziert sowie die Potenziale und Herausforderungen für die Automatisierung von Demontageprozessen aus bestehenden Erkenntnissen abgeleitet. Auf Grundlage der Explorationsergebnisse wird die explizite Forschungsfrage der Untersuchung als Reflexion der Zielsetzung auf die identifizierten Potenzialfelder formuliert. Aus dieser Frage heraus werden für die einzelnen Teilaspekte Hypothesen abgeleitet, deren Untersuchung einen maßgeblichen Anteil an der Beantwortung der Forschungsfrage hat. Für jede der entwickelten Hypothesen erfolgt weiterhin eine wissenschaftstheoretische Evaluation (vgl. [177]), zur Bestimmung und Einordnung valider Untersuchungsstrategien im Hinblick auf die theoretische und experimentelle Evaluation in Kapitel 5. Zur Sicherstellung der zielorientierten Vorgehensweise werden die Hypothesen darüber hinaus mit den Prämissen der Zielsetzung einer nachhaltigen Verbesserung der Verwertungsprozesse durch die robotergetriebene Demontage abgeglichen. Der tatsächliche *Forschungsbeitrag* liegt im Ergebnis der Untersuchung der entwickelten Hypothesen. Hierfür wird auf Basis der Anforderungen eine kognitive Robotersteuerung (*Robot Cognition Processor*, Kapitel 4) entwickelt. Anhand eines weiteren Abgleichs zur Umsetzungsvalidierung wird sichergestellt, dass die Systemanforderungen sowohl die als Ergebnis der Exploration identifizierten Potenziale aufgreifen, als auch die Evaluation der Hypothesen ermöglichen. Die Evaluation und Validierung der Forschungsergebnisse gemäß den wissenschaftstheoretisch angemessenen Untersuchungsstrategien in Bezug auf die Hypothesen sowie eine kritische Bewertung des Forschungsergebnisses vervollständigen die Forschungsheuristik.

Die Ergebnisse der Exploration zum technisch-wissenschaftlichen Stand der Forschung sind in Abbildung 3.2 gemäß der Hauptthemengebiete in drei Explorationscluster eingeteilt. Mit dieser Einordnung wird klar, dass der Bereich der Demontageautomatisierung bislang nur unzureichend untersucht worden ist und es für reale Anwendungen noch keine praktikablen Technologien gibt, die einen flexiblen Einsatz unter Berücksichtigung aller Variablen erlauben. Ein großes Problem im Bereich des Demontageprozesses stellt die Prozessplanung und Entscheidungsfindung dar. Manuelle Tätigkeiten sind im Demontagebereich Stand der Technik und es findet wenig bis kein Datenaustausch statt. Der Einsatz von Robotern in diesem Umfeld birgt zahlreiche technische Anforderungen. Effizienzpotenziale, vor allem wirtschaftlicher Art, ergeben sich dabei für eine individuelle, wissensbasierte Vorgehensweise. Um

diese wirksam umzusetzen, kann ein kognitives Robotiksystem eingesetzt werden. Über die wirtschaftlichen Effekte hinaus können hierbei ebenso ökologische und soziale Dimensionen berücksichtigt werden, um den Zielaspekt der Nachhaltigkeit zu realisieren. Das Schlüsselement dafür, die Integration in ein ganzheitliches, übergeordnetes Informationsmanagement, ist bislang nicht erfolgt.

Explorationscluster 1: Demontageprozess

Bewertung und Entscheidung in der Planung von Demontageprozessen kann bislang nur auf Grundlage von Verallgemeinerungen getroffen werden

Adaptive Prozessplanung oft nicht möglich

Kein Datenaustausch zwischen verschiedenen Akteuren der Kreislaufwirtschaft

Manuelle Prozesse sind Standard in der Demontage komplizierter Produkte

Explorationscluster 2: Robotik in der Demontage

Starke Abhängigkeit von Produktdaten

Individuelle Produktzustände werden nicht in die Verwertungsentscheidung einbezogen

Wissensdatenbanken immer nur für spezifische Prozesse entwickelt, keine übergreifende Verknüpfung

Lifecycle-Daten für Demonteure nicht individuell erhältlich

Produkt- und Prozesswissen werden nicht standardisiert abgelegt / ausgetauscht

Für den Einsatz von MRK-Konzepten im industriellen Umfeld sind umfangreiche Verbesserungen der Sicherheitseinrichtungen erforderlich

Bildverarbeitungssysteme müssen eine große Varianz an Bauteilen, insb. kleine Verbinder zuverlässig identifizieren und detektieren können

Lernfähigkeit und Adaption auf unbekannte Produktvarianten bislang nicht systemimmanent implementierbar

Eine erhöhte Systemautonomie erfordert ein angepasstes Kapazitäts- und Datenstrommanagement

Keine modularen Werkzeugsysteme für die robotergestützte Demontage verfügbar

Alle bisherigen Systeme sind produktspezifisch entwickelt, es gibt keine allgemeine, generalisierte Methodik

Planungsautonomie nicht ausreichend für die wirtschaftlich-effiziente Erfüllung von Takzeiterfordernissen

Eine multidimensionale Entscheidungsinstanz für die Demontageplanung verbessert die Effizienz der Demontage

Explorationscluster 3: Kognitive Robotik

Externe Informationen und standardisierte Kommunikation erforderlich (gemeinsame Ontologie)

Selbstoptimierende Systeme nicht ideal umsetzbar, durch übergeordnetes Informationsmanagement quasi-selbstoptimierende Zielsetzung durch Prozessverknüpfung

Feststellung des Ist-Zustandes (S_0 -Problem) für kognitive Agentensysteme erforderlich

Sequenzplanung als formalisierte Darstellung der Entscheidungshierarchie unter Berücksichtigung technischer Bedingungen

Die notwendige Wissensbasis kann nur auf Grundlage eines gesamtheitlichen Informationsmanagements realisiert werden

Für jedes Produkt kann auf Basis der Informationssynthese ein digitales Produktmodell erstellt werden

Selektive, individuelle Prozessgestaltung profitabler als Entscheidung auf Basis allgemeiner Daten

Entscheidungsziele im Bereich der Demontage sollten an Nachhaltigkeitsdimensionen orientiert sein

Bestmögliche Abbildung menschlicher Fähigkeiten, kontextsensitiv möglich durch kognitive Robotik

Kognitive Robotik kann als Assistenzsystem für Mitarbeiter verstanden werden

Kategorisierung (Legende)

Problemstellung Informationsmanagement

Technische Anforderung

Ökonomisches Potenzial Demontage

Soziales Potenzial Demontage

Ökologisches Potenzial Demontage

Abbildung 3.2: Forschungsperspektiven aus dem Stand der Wissenschaft und Technik der Teilgebiete

Die im Rahmen der Vorstudie zum technisch-wissenschaftlichen Stand identifizierte Forschungslücke offenbart, dass zur Lösung der akuten Problemstellungen im Feld der roboterbasierten Demontageautomatisierung in allen relevanten Teilgebieten ein ganzheitliches Informationsmanagement notwendig ist. Um dieses Informationsdefizit zu beseitigen reicht es nicht aus, eine horizontale Integration allein im Bereich der Demontagebetriebe zu vollziehen; es muss vielmehr im Rahmen einer übergreifenden Kreislaufwirtschaft auch eine vertikale Informationsintegration erfolgen, die sowohl auf Produkt- als auch auf Prozessebene alle relevanten Informationen zum Produkt, dessen Lebenszyklus und der Verwertungspotenziale berücksichtigt. Alle diese Punkte sind für einen begründeten Entscheidungsprozess über die konkrete Verwertungsfolge eines zu demontierenden Bauteils bedeutsam. Es muss also ermöglicht werden, dass an diesem Punkt eine Entscheidung unter Berücksichtigung der relevanten Daten und unter Maßgabe der Zieldimensionen aus der Nachhaltigkeitsanforderung getroffen werden kann. Um ein solches Informationsmanagement umzusetzen, ergeben sich zahlreiche technische Anforderungen aus der Analyse, die bislang im Rahmen der Forschung noch nicht gelöst worden sind (vgl. Abbildung 3.2). Es stellt sich daher folgende Frage:

Wie kann mit Hilfe von Industrie 4.0-Technologien bzw. Digitalisierungswerkzeugen eine flexible Prozessautomatisierung in der Demontage erreicht werden, sodass unter Berücksichtigung der Zieldimensionen der Nachhaltigkeit ein ganzheitliches Informationsmanagement etabliert werden kann, um den Prozess der Kreislaufwirtschaft stakeholderübergreifend zu verbessern?

Die Beantwortung dieser Forschungsfrage eröffnet einen weitläufigen Lösungsraum. Um eine zielgerichtete Untersuchung der Antwortmöglichkeiten zu gewährleisten, sollen im Folgenden Hypothesen aus der Forschungsfrage und den Explorationsergebnissen abgeleitet werden. Um eine Gleichwertigkeit der aus der Forschungsfrage abgeleiteten Hypothesen zu gewährleisten, soll für jeden Aspekt eine allgemeine Hypothese auf der methodischen Ebene entwickelt werden, für die dann gegebenenfalls weitere, untergeordnete Hypothesen aufgestellt werden können.

H₁: Bislang existieren im Bereich der Kreislaufwirtschaft keine durchgängigen Informationsmanagement-Modelle bis auf Demontageebene. Industrie 4.0 Technologien sowie kognitive Robotik erlauben die Verknüpfung von Wissensdatenbanken und Agenten in Fertigungssystemen. Es ist daher möglich, ein durchgängiges Informationsmanagement zu implementieren, welches es erlaubt, die einzelnen Akteure der Kreislaufwirtschaft mit einer spezifischen technischen Einheit im Demontageprozess direkt zu verbinden und bidirektional Produkt- und Prozessinformationen auszutauschen.

H₂: Der Verwertungsweg einer Komponente kann individuell in Abhängigkeit von deren Zustand und Lebenszyklus betrachtet werden. Robot Cognition Systeme sind in der Lage mit Wissensrepräsentationen in komplexen und unbekannten Umgebungen als Entscheidungsagenten zu agieren. Die Bereitstellung produktindividueller Lebenszyklus-Daten sowie die direkte, maschinelle Analyse des Bauteils erlauben also eine autonome Entscheidung über den Verwertungsweg durch den Roboter.

H_{2.1}: Entscheidungsmodelle in der Demontage werden bislang nur unter der Prämisse ökonomischer Ziele, in seltenen Fällen auch ökonomisierter ökologischer Äquivalenzwerte formuliert. Nachhaltige Entscheidungen umfassen allerdings ökonomische, ökologische und soziale Aspekte. Es sollen daher alle Zieldimensionen der Nachhaltigkeit in der Verwertungsentscheidung des Roboters berücksichtigt werden.

H₃: Bisherige manuelle Demontageprozesse erzeugen einen hohen Personalkostenanteil. Die Automatisierung von Demontageprozessen erfordert einen spezifischen Investitionsaufwand. Um im Sinne einer Förderung der Kreislaufwirtschaft nachhaltige Verwertungsprozesse attraktiver zu gestalten, muss eine Automatisierung eine Verbesserung der Demontage zur Folge haben. Die hybride Demontage in

Mensch-Roboter-Kollaboration verbessert den Prozess im Vergleich zu einer konventionellen, manuellen Demontage in Bezug auf ökonomische, ökologische und soziale Zielsetzungen.

Gemäß der methodischen Vorgehensweise ist zu prüfen, ob die Untersuchung der Hypothesen einen Beitrag zum Forschungsgegenstand gemäß der formulierten Zielsetzung bietet (Prämissenvalidierung). Die Hypothesen $H_{2,1}$ und H_3 zielen direkt auf die *nachhaltige* Verbesserung von Verwertungsprozessen durch eine automatisierte Entscheidungsinstanz ab, das Untersuchungsergebnis ist also als direktes Ergebnis im Sinne der Zielsetzung interpretierbar. H_1 hingegen stellt eine grundlegende technische Bedingung auf Basis der identifizierten Forschungspotenziale dar und ist als Primärhypothese Voraussetzung für eine mögliche Beantwortung von H_2 unter der Prämisse, dass Entscheidungen informationsabhängig sind (siehe dazu [156]). H_2 selbst ist als Folge der der Zielsetzung zu Grunde liegenden Theorie einer *roboterbasierten* Lösung zur Verbesserung der Verwertungsprozesse zu betrachten und erfüllt daher das Prämissenkriterium unmittelbar. H_3 als generalisierte Aussage in Bezug auf den Zielaspekt der *Verbesserung* impliziert eine quantitative Messbarkeit der Auswirkungen des Forschungsergebnisses auf den Demontageprozess im Vergleich zum *status quo* der realwirtschaftlichen Gegebenheiten. Die entwickelten Hypothesen erfüllen somit die Prämissen der Zielsetzung.

Abschließend sollen die Vorgehensweise sowie die entwickelten Hypothesen vor einem wissenschaftstheoretischen Hintergrund reflektiert werden. Da die der Arbeit zugrundeliegende Heuristik keiner präskriptiven Strömung der Wissenschaftstheorie explizit folgt, soll die Analyse *kritisch*, d. h. im Sinne der Prüfung einer möglichen Diskrepanz zwischen Zielen und Methodik, erfolgen [177]. Bei ingenieurwissenschaftlicher Forschung handelt es sich um eine empirische Disziplin, in der Theorie und Experiment eine enge Verknüpfung aufweisen. Die experimentelle Ergänzung der reinen Beobachtung stellt damit ein wichtiges Kernelement des Erkenntnisprozesses dar. Dabei ist zu beachten, dass die Frage über die Entstehung von Erkenntnis nicht als die Frage nach ihrer Begründung missverstanden werden darf, da die Erklärungen darüber wie Erkenntnisse zustande kommen nicht zwingend begründen, warum diese möglicherweise wahr sind [178]. Der Erkenntnisprozess selbst kann dabei entweder einer deduktiven Strategie, also der Ableitung konkreter Sachverhalte aus allgemeinen Gesetzen [179], oder einer induktiven Vorgehensweise, also dem Schluss von der Beobachtung auf einen allgemeinen Fall [180], folgen. Der Auffassung der logischen Positivisten nach sind wissenschaftliche Aussagen immer auf sog. Protokollsätze rückführbar, die den beobachteten Zusammenhängen zwischen Sachverhalten entsprechen, also dem *Verifikationsprinzip* nach induktiv-empirisch zu bestätigen sind (bis auf die aus Synthese rein logischer Ausdrücke mathematisch bewiesenen Sätze) [181]. Seit *Popper* ist jedoch nachgewiesen, dass die induktive Methode nicht in der Lage ist, die Gültigkeit einer Theorie oder Hypothese endgültig zu beweisen [182]. Diesem kritischen Rationalismus folgend ist die einzige Möglichkeit die deduktive Überprüfung von Theorien und das *Falsifikationsprinzip*. Dabei müssen folgende Schritte beachtet werden [177]:

- 1) Ist die Theorie/Hypothese logisch konsistent bzw. widerspruchsfrei?
- 2) Handelt es sich um eine empirische Theorie (sagt sie etwas über die Welt aus und ist frei von Tautologien)?
- 3) Würde die Theorie/Hypothese einen Fortschritt gegenüber bestehenden Kenntnisständen darstellen?
- 4) Empirische Überprüfung: Wird die Hypothese experimentell bestätigt, hat sich die Theorie *bewährt*, wird sie nicht bestätigt, gilt sie als *falsifiziert*. Zentraler Aspekt ist hierbei die Prognose auf Grundlage der aufgestellten Theorie unter den angenommenen Randbedingungen.

Im Fall einer Falsifikation müssen alle Randbedingungen geprüft werden, da immer das gesamte System als falsifiziert gilt. Die potenzielle Falsifizierbarkeit einer Hypothese stellt damit das zentrale Kriterium der Wissenschaftlichkeit dar [182]. *Allquantifizierte* Sätze, also allgemeingültige Aussagen über einen Sachverhalt, sind nur nach dem Falsifikationsprinzip sinnvoll untersuchbar; *existenzquantifizierende* Sätze hingegen können dem Verifikationsprinzip folgend untersucht werden (Nachweis bezüglich des grundsätzlichen Vorhandenseins eines empirischen Sachverhaltes durch Beobachtung und Experiment) [177]. Diese disjunkten Voraussetzungen für die Sinnhaftigkeit einer wissenschaftlichen Hypothese sind, wie oben bereits erwähnt, streng von deren Wahrheitswert in Bezug auf die reale Welt zu unterscheiden (ob eine Hypothese wahr oder falsch ist, stellt in diesem Sinne ein erst durch die wissenschaftstheoretisch einwandfreie Aufstellung auffindbares Ergebnis des Untersuchungsprozesses dar).

In Bezug auf den Forschungsgegenstand dieser Arbeit werden in Tabelle 3.1 die aufgestellten Hypothesen ausgewertet. Die logische Widerspruchsfreiheit kann dabei aufgrund der Formulierung in allen Hypothesen nachgewiesen werden. Das Empirie-Kriterium ist ebenfalls durchgehend erfüllt, da sich alle Hypothesen auf konkrete Prozesse im Bereich der Demontage beziehen und somit real beobachtbar und grundsätzlich falsifizierbar sind. Da die Hypothesen aus der Forschungsfrage folgen und sich diese in Konformität zur Zielsetzung und zum Explorationsergebnis befinden, kann für die Untersuchung der Hypothesen ebenfalls durchgängig von einem Fortschritt auf den Wissenschaftsgebieten der Demontage und Robotik gesprochen werden. Die Quantifizierung unterscheidet sich dahingehend, dass die Hypothesen H_1 , H_2 und $H_{2.1}$ existenzquantifizierend sind, da hier die Möglichkeit eines Sachverhaltes postuliert wird, woraus als valide Untersuchungsstrategie das Verifikationsprinzip durch eine empirisch nachweisbare Umsetzung folgt. H_3 hingegen ist ein allquantifizierender Satz, da die Verbesserung des Demontageprozesses allgemeine Gültigkeit besitzen sollte, woraus die Falsifikation als geeignete Untersuchungsstrategie verfolgt werden muss.

Tabelle 3.1: Wissenschaftstheoretisch-kritische Überprüfung der Hypothesen

Hypothese	Widerspruchsfreiheit	Empirie	Fortschritt	Quantifizierung	Strategie
H_1	Gegeben	Erfüllt	Ja	\exists	Verifikation
H_2	Gegeben	Erfüllt	Ja	\exists	Verifikation
$H_{2.1}$	Gegeben	Erfüllt	Ja	\exists	Verifikation
H_3	Gegeben	Erfüllt	Ja	\forall	Falsifikation

Als Ergebnis der Untersuchung der Forschungsfrage wird in den folgenden Kapiteln eine allgemeine Methodik entwickelt und am Beispiel der Traktionsbatterie validiert. Die Evaluationsstrategien für die aufgestellten Hypothesen folgen dabei entsprechend ihrer quantifizierenden Aussage dem Verifikations- oder dem Falsifikationsprinzip. Es kann sich bei einem *Robot Cognition Processor* also nicht um ein spezifisches Produkt handeln. Es ist viel mehr als Funktionsprinzip einer Automatisierungsstrategie zu verstehen, die ausschließlich im Kontext ihrer Integration in ein übergreifendes Informationssystem funktionsfähig sein kann (Folge des erfüllten Falsifizierbarkeitskriteriums).

4 Konzeptentwicklung Robot Cognition Processor

Das vierte Hauptkapitel befasst sich mit der Entwicklung des technologischen Konzeptes zur Untersuchung der aufgestellten Forschungshypothesen. Der Ablauf nach Abbildung 4.1 stellt dabei die Entwicklung einer Systemarchitektur sowie der einzelnen Module in den Fokus. Nach der einer methodisch bestimmten Vorgehensweise folgenden Definition der Anforderungen und der Entwicklung eines idealisierten Prozessablaufes basierend auf Informations-, Materialfluss und Arbeitsschritten werden die einzelnen Funktionsgruppen im Gesamtsystem vorgestellt und detailliert beschrieben. Die Systemkommunikation als wesentliches Element zum erfolgreichen Informationsaustausch wird in Bezug auf die Systembestandteile und deren technische Anforderungen festgelegt. Eine Umsetzung des Konzeptes am Beispiel einer prototypischen Demontageanwendung für Elektro-Traktionsbatterien beschließt das Kapitel und bildet die Grundlage für die empirische Evaluation und Validierung.

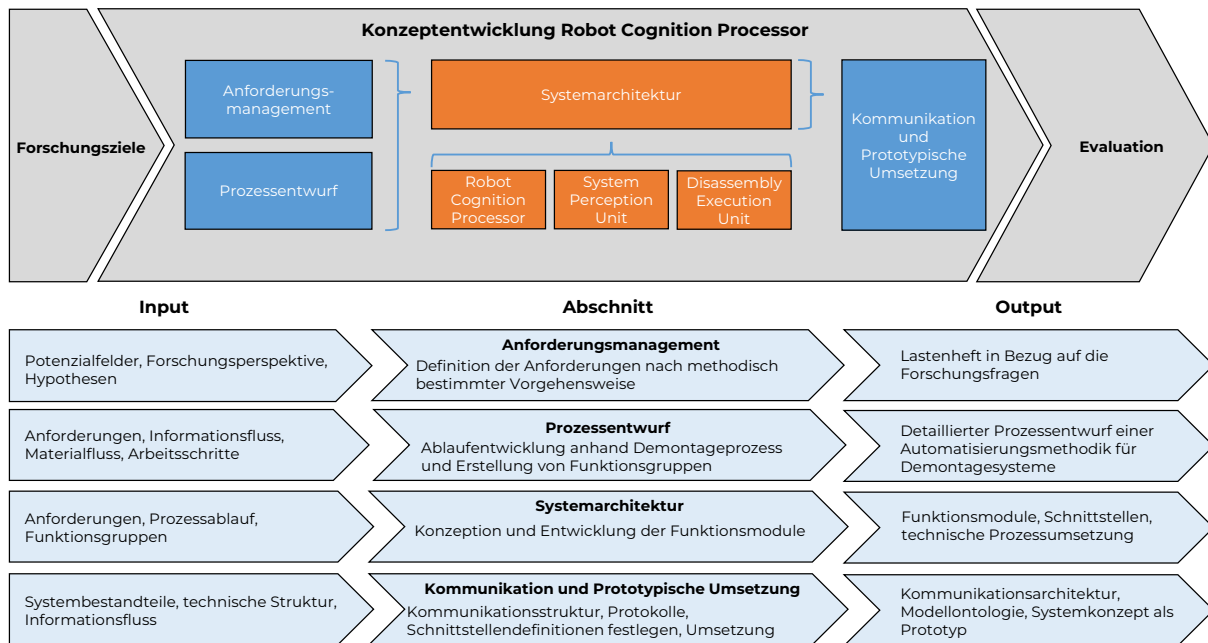


Abbildung 4.1: Ablauforientiertes Vorgehen der Konzeptentwicklung

4.1 Anforderungsmanagement und Problemstellungen

Ein umfassendes und systematisches Anforderungsmanagement beschreibt die Voraussetzungen oder Funktionen, die ein technisches System erfüllen muss [183]. Um diese zu bestimmen, ist ein methodisches Vorgehen erforderlich. Gemäß der internationalen Norm „*Systems and software engineering - System life cycle processes*“ ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [184] können die Systemanforderungen in vier Schritten bestimmt werden (siehe Abbildung 4.2). Das Anforderungsmanagement ist dabei ein technischer Prozess, dessen Grundlage ein reales Szenario darstellt. Hierfür müssen zu Beginn die beteiligten Stakeholder sowie die Nutzungsszenarien geklärt werden. Die notwendigen Funktionen und deren Randbedingungen werden daraufhin in einem ersten Schritt bestimmt. Dieser Schritt transformiert die identifizierten Problemfelder bereits in technische Anforderungen. Im Folgenden werden die Implementierungsbedingungen im Kontext des Gesamtsystems definiert. Die Festlegung der Risiken, der Kritikalität sowie die Output-Charakteristik kann dann basierend auf den ersten beiden Schritten erfolgen und ermöglicht so die Anforderungspriorisierung innerhalb des Systems und gegenüber externen Einflüssen. Die funktionsorientierte Definition der Systemanforderungen schließt den Prozess ab.

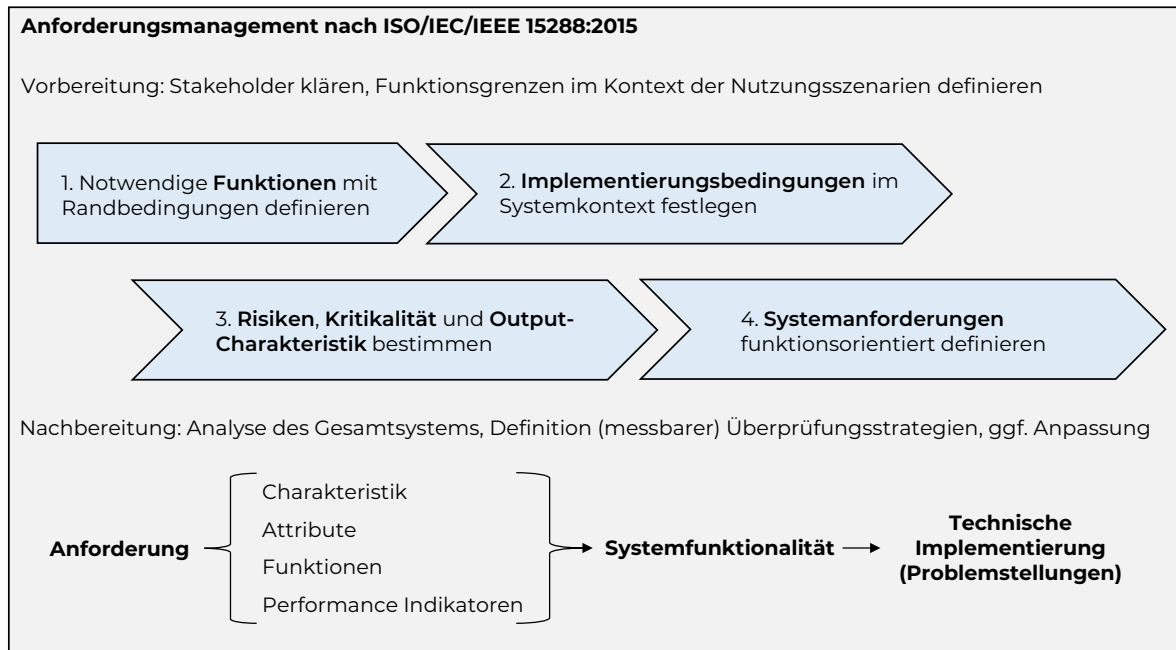


Abbildung 4.2: Prozess Anforderungsmanagement nach ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [184]

Die Anforderungen bestehen neben konkreten Funktionen aus einer Benennung der Input und Output Charakteristik, assoziierter Attribute sowie (messbaren) Performance-Indikatoren. Die aus diesen Anforderungen hervorgehenden Systemfunktionalitäten erzeugen ihrerseits neue Problemstellungen in Bezug auf die technische Implementierung.

Nutzungsszenarien und Stakeholder

Um in Vorbereitung auf das Anforderungsmanagement das Einsatzszenario im Bereich der Demontage von Baugruppen zu klären, wurden im Rahmen der Untersuchungen drei konkrete Demontageprozesse analysiert. Bei den in den Szenarien betrachteten Unternehmen handelt es sich um Projektpartner aus dem EFRE-Innovationsverbund *Recycling 4.0*.

Getriebe-Aufbereitung: Im Rahmen der Aufbereitung von LKW-Getrieben werden die Produkte zum Ende ihres Lebenszyklus zerlegt und bei Eignung in einem Remanufacturing-Prozess aufgearbeitet. Die Getriebe werden dafür nach der Eingangsdokumentation sortiert und in einem Zwischenlager verwahrt. Verfügbare Daten werden dem Lieferschein entnommen und in einer Datenbank dokumentiert. Die Anforderung der Getriebe zur Reinigung und Demontage erfolgt nach dem Pull-Prinzip. Es werden so pro Schicht etwa 10 Getriebe demontiert, was zu einem Output von mehr als 2500 Komponenten führt, von denen es sich bei ca. 1500 bis 2000 Teilen um Norm- und Verschleißteile handelt, die direkt dem stofflichen Recycling zugeführt werden. Der vollständig manuelle Demontageprozess nimmt pro Getriebe eine mittlere Dauer von 117 Minuten in Anspruch. Die Demontage erfolgt nach produktindividuellen Anleitungen für eine Variantenvielfalt von 100 verschiedenen Getrieben (83 Stück Hersteller A, 17 Stück Hersteller B, Stand 2019). Für die Demontage ist der Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge und Spezialvorrichtungen zum Heben der Wellen und zum Abziehen der Lager erforderlich. Die eingesetzten Mitarbeiter verfügen über eine Facharbeiterausbildung und sind an den Demontagestationen angelehrt. Nach der Demontage der Getriebe erfolgt eine Befundung der Baugruppen und Komponenten und daraufhin die Festlegung, welche Teile für das Remanufacturing verwendet werden können und welche ausgetauscht werden müssen. Die aufbereiteten Getriebe haben eine zweijährige Garantie und die Beanstandungsquote liegt bei ca. 1%. Eine Rentabilitätsprüfung wird vorab nicht durchgeführt und die

Quote der aufzuarbeitenden Getriebe liegt bei etwa 67% nach der Befundung der Komponenten. Durchschnittlich werden für etwa 358 € Austauschteile benötigt. Für neue Getriebetypen oder Änderungen im Prozess müssen die Anleitungen manuell angepasst werden.

Löschmittel-Recycling: Aufgrund gesetzlicher Vorgaben müssen Löschmittelträger in öffentlichen Bereichen wie z. B. Hand-Feuerlöscher nach einer festgelegten Nutzungsphase entsorgt werden. Dies führt zu einem hohen Aufkommen an Feuerlöschern, die in der Folge dem Recycling zugeführt werden. Da sowohl der Betriebsstoff als auch die Materialien der Feuerlöscher einen Restwert haben, ist die Demontage der Löscher zur Trennung der Komponenten erforderlich. Nach einer Sammlung und Sortierung der Feuerlöscher nach Gewichtsklassen und Löschmittelarten werden die Geräte gemäß den Anforderungen (teilweise Gefahrgut) zwischengelagert. Löscher mit weniger als 2 kg Gewicht werden aus wirtschaftlichen Gründen nicht demontiert, Löscher mit mehr als 50 kg Gewicht werden in spezialisierte Unternehmen gebracht, da die Größe der Behandlungsstationen nicht ausreicht. Der erste Schritt der Behandlung ist die Absaugung des Löschmittels. Beim nachfolgenden Zerlegungsprozess unterscheiden sich vor allem die Varianten der Dauerdruckfeuerlöscher und Aufladefirelöscher gemäß ihrem funktionsbedingten Aufbau. In der Demontage wird zunächst der Kopf des Löschers mit Hilfe eines Hammers und eines Meißels manuell abgetrennt. Daraufhin können Armatur und Steigrohr abgeschraubt und aus dem Gehäuse entnommen werden. Nach Entfernung von Löschmittelresten kann auch der Behälter aus Stahl oder Aluminium verwertet werden. Alle Komponenten werden stofflich recycelt, wobei vor allem die Armaturen und Steigrohre aus Messing oder Aluminium den wirtschaftlichen Ertrag sichern. Das Löschmittel wird in Folgeprozessen verfahrenstechnisch zu Düngemittel für den Maisanbau verarbeitet. Die Arbeitskräfte in der Löscherdemontage sind größtenteils ungelernt und das Arbeitsumfeld ist ergonomisch und in Bezug auf die Luftbelastung als kritisch einzustufen.

Elektrofahrzeug-Erstbehandlung: Mit einer durch die Verkehrswende ansteigenden Menge von Elektrofahrzeugen wird sich auch die Zahl der Rückläufer an deren Lebenszyklusende erhöhen. Bei Fahrzeug-Erstbehandlern spielen daher vor allem Prozesse im Umgang mit der Hochvolttechnik und der Entnahme der Traktionsbatterie eine wichtige Rolle. Ist diese beschädigt, besteht ein hohes Risiko hinsichtlich Brandgefahr oder dem Austreten von umweltschädlichen Stoffen, weshalb Transport, Lagerung und innerbetriebliche Handhabung besonders berücksichtigt werden müssen. Die Diagnose der Batterie erfolgt auf Grundlage der Daten aus den Steuergeräten und einer Bewertung des Allgemeinzustandes des zu verwertenden Fahrzeugs. Ist ein direktes Ansprechen des Fahrzeugs über die Diagnose-schnittstelle nicht mehr möglich, wird ein Rest-Bus-Simulation genutzt, um den Systemstatus zu erhalten. Eine grundlegende Klassifizierung der verwendeten Batterietechnologien erfolgt vorab auf Basis des Fahrzeugmodells. Die Entnahme der Batterien wird unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Vorschriften durch zertifiziertes Fachpersonal (sog. „*Fachkundige für Arbeiten an HV-eigensicheren Systemen an Kraftfahrzeugen*“) vollzogen. Die Arbeitsplätze hierfür sind gemäß der DIN EN 50191 [185] abgesperrt und verfügen über geeignetes, hochspannungssicheres Werkzeug. Ein Arbeitszyklus dauert etwa eine bis drei Stunden in Abhängigkeit von Modell und Zustand. Die Batterien werden gesammelt, sortiert und zur weiteren Verwendung oder stofflichen Verwertung an einen Betrieb zur Batteriedemontage oder den Fahrzeughersteller (Rücknahmepflicht) verbracht. Die rechtliche Situation ist in diesem Wirtschaftsfeld volatil und diverse Neuregelungen müssten bei der Investition in entsprechende Infrastruktur beachtet werden. Der Ablauf der weiteren Behandlung nach Batterieentnahme erfolgt analog dem von konventionell angetriebenen Fahrzeugen.

Die beschriebenen betrieblichen Prozesse bedingen in ihrer Gesamtheit die in Tabelle 4.1 aufgeführten Stakeholder und deren allgemeine Anforderungen. Diese Übersicht dient somit als Vorarbeit für die Festlegung der Systemfunktionen und deren Randbedingungen.

Tabelle 4.1: Stakeholder der Demontage und Anforderungen auf Basis der Szenarienanalyse

Stakeholder	Anforderungen (prozessintern/prozesseextern)
Demontage-Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> – Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses – Produktinformationen – Prozessinformationen – Niedrige Taktzeiten – Hohe Core-Verfügbarkeit – Absatz der Komponenten und Materialien
Mitarbeiter	<ul style="list-style-type: none"> – Persönliche Sicherheit – Ergonomie – Ausstattung (Werkzeuge) – Qualifikation – Entlohnung
Staat	<ul style="list-style-type: none"> – Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen – Erhalt von inländischer Wertschöpfung
Umwelt	<ul style="list-style-type: none"> – Vermeidung von Kontamination – Hohe Wiederverwendungsquote – Geringe Disposal/Landfill-Quote
Vorh. Produkteigentümer	<ul style="list-style-type: none"> – Entsorgung des Altproduktes
Kunde (Fall: Remanufacturing)	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitätsanspruch – Produktverfügbarkeit
Recyclingunternehmen	<ul style="list-style-type: none"> – Homogene Materialströme – Planbarkeit Arten und Mengen
Produkthersteller (OEM)	<ul style="list-style-type: none"> – Entsorgung der Altprodukte (Rücknahmepflichten) – Gewinnung von Sekundärrohstoffen zur Befriedigung der Nachfrage

Bei der Betrachtung der Stakeholder und der aus den Szenarien resultierenden Anforderungen ist die Differenzierung zwischen prozessinternen, also direkt im Demontageprozess beeinflussbaren Anforderungen und prozessexternen (in Grau dargestellt), also von angrenzenden Schritten vorgegebenen Anforderungen wichtig, um notwendige Funktionen für die Demontageautomatisierung zu definieren. Als Synthese dieser Stakeholderforderungen sowie der Explorationscluster und Hypothesen des Forschungsvorhabens werden in Tabelle 4.2 folgende Funktionen und deren Randbedingungen definiert.

Tabelle 4.2: Funktionen des automatisierten Demontageprozesses im Anwendungskontext

Funktion	Randbedingung
1. Fähigkeit zur Demontage von Produkten	Vereinzelung von Komponenten einer Baugruppe
1.1. Demontageplanung	Planung aller erforderlichen Vorgänge für 1.1.
1.1.1. Entscheidung bauteilspezifisch (Demontagetiefe)	Produktindividuelle Entscheidung über Demontage auf Grundlage verfügbarer Informationen
1.1.2. Sicherstellung Nachhaltigkeit	Zieldimensionen Wirtschaft, Umwelt, Soziales
1.2. Demontagesequenzplanung	Festlegung Reihenfolge der Ausführung nach 1.1.
1.3. Demontageausführung	Umsetzbarkeit Konzept zur Durchführung

2. Einbezug oder Ersatz der Mitarbeiter	Vollautomatisierung nicht für alle Produktgruppen möglich, falls Nein, Werkerführung und/oder MRK
3. Technologieverfügbarkeit (Werkzeuge)	Fügeverfahren bestimmen Trennanforderungen
4. Compliance 4.1. Sicherheit 4.2. Umwelt	Gesetze, Normen Gefahrgut, Anlagentechnik Immission, Berücksichtigung von Handlungsfolgen
5. Trennung unterschiedlicher Materialien	Berücksichtigung von Materialinformationen aus Produktdaten, Vereinzelung gemäß 3. und 1.3.
6. Werterhalt von Funktionsgruppen 6.1. Demontageplanung siehe 1.1. 6.2. Demontagesequenz siehe 1.2. 6.3. Demontageausführung siehe 1.3.	Werterhalt für höherwertige Verwertungsoptionen wie z. B. Reuse oder Remanufacturing (Funktion, optischer Status, funktionelle Systemintegrität)
7. Informationsmanagement	Austausch der relevanten Informationen für den Demontageprozess und der gewonnenen Erkenntnisse aus dessen Durchführung
8. Lernfähigkeit	Stetige Verbesserung der Funktionalität im Rahmen der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten

In einem technischen Gesamtsystem stellen diese Funktionen vor allem die Verfügbarkeit von Informationen als zentrale Bedingung für eine erfolgreiche Implementierung in den Vordergrund (vgl. Kapitel 2.2). Die Integration soll ausdrücklich für unterschiedliche Demontagefälle möglich sein, was zu unterschiedlichen Umsetzungsstrategien in Bezug auf die verwendete Hardware führen kann, vor allem bei den Trennverfahren in Abhängigkeit der verwendeten Fügetechnologien. Unter diesem Gesichtspunkt ist weiterhin eine offene Gestaltung der Schnittstellen zwischen den Systemagenten sowie externen Quellen und Senken erforderlich. Um den Austausch der Informationen zu gewährleisten wird darüber hinaus eine standardisierte Verfügbarkeit der Informationen (Ontologie und Strukturmodell) zu einer weiteren wesentlichen Implementierungsbedingung. Das zu entwickelnde Konzept soll grundsätzlich in Bezug auf die zu demontierenden Produkte übertragbar und gleichzeitig in einem Circular-Economy-Modell mit unterschiedlichen prozessexternen Stakeholdern und Systemen verknüpfbar sein (vgl. [32]). In Erweiterung der bestehenden Konzepte aus Abschnitt 2.3 soll in diesem Zusammenhang nicht nur die Frage, ob die automatisierte Demontage technisch möglich ist, beantwortet werden, sondern auch eine produktindividuelle Überprüfung der Sinnhaftigkeit dessen auf Bauteilebene erfolgen.

Die Bestimmung der Risiken, der Kritikalität und der Output-Charakteristik in Bezug auf die Funktionsanforderungen bedarf gemäß ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [184] der Festlegung von Messgrößen hinsichtlich des technischen Erfolges. In Tabelle 4.3 werden mögliche Bewertungsstrategien festgelegt, die im Rahmen der Evaluation in Kapitel 5 vertieft betrachtet und ausgewertet werden sollen. Ein besonderer Fokus liegt hier ebenfalls auf den in [50] genannten allgemeinen Problemen und Risiken der Demontageautomatisierung. Aus technischer Perspektive werden dort folgende kritische Punkte genannt:

- Verfügbarkeit der notwendigen (Struktur-)Informationen
- Verfügbarkeit der erforderlichen Werkzeuge und Handhabungsoptionen
- Identifikation von Ausführungsfehlern und Finden von Alternativen

- Planungskomplexität steigt, je weniger Beschädigung zulässig ist
- Mehrdimensionale Variantenvielfalt (Derivate und Zustände) stellt hohe Anforderungen an Identifikation und Detektion von Komponenten und Verbindern (Risiko Fehlklassifikation)
- Ausführungsüberwachung: Feststellung der konkreten Zustandsveränderung

Neben der Einschätzung der technischen Risiken ist die Wirtschaftlichkeit ein zentraler Faktor für den Einsatz des Konzeptes in realen Demontageumgebungen. Da die Ausgestaltung der tatsächlichen Anlage und das individuelle Demontagekonzept die finalen Kosten bestimmen, hier jedoch vorerst ein allgemeines Konzept entwickelt werden soll, ist es nicht möglich, vorab konkrete Zielansprüche hinsichtlich Renditen oder Effizienzverbesserungen zu formulieren. Im Rahmen der in Kapitel 4.5 vorgestellten Fallstudie wird in der Evaluation eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit für den konkreten Anwendungsfall durchgeführt. Generell müssen für den wirtschaftlichen Betrieb die Möglichkeit zur Demontage unterschiedlichster Produkttypen und –status, eine Strategie für den Umgang mit Unsicherheiten, eine gewisse Prozessgeschwindigkeit, die Vermeidung der Gefährdung der Mitarbeiter sowie ein hoher Werterhalt im Produkt gegeben sein [50].

Tabelle 4.3: Output-Charakteristik und Messgrößen für die Systemfunktionen

Funktion	Output	Messgröße/Bewertung
Demontageplanung	Demontageentscheidung für individuelle Produkte auf Bauteilebene, gesamtheitliche Demontagetiefe, Verwertungsentscheidung	Klassifizierungsergebnis Demontagetiefe (%)
Nachhaltigkeitsanspruch	Ausgewogene Entscheidungen unter den Zielaspekten der Nachhaltigkeit	Qualitative Evaluation
Demontagesequenzplanung	Reihenfolge der zu demontierenden Bauteile unter Berücksichtigung der Demontageplanung und der Produktstruktur	Demontageerfolg Zeitverbesserung
Demontageausführung	Demontiertes Produkt	Ausführungsquote
Mitarbeiterinbezug	Verbesserung der Mitarbeitereffizienz	Teiledurchsatz, Zeiten
Technologieverfügbarkeit	Möglichkeit zum Einsatz unterschiedlicher technischer Verfahren	Standardisierung der Prozessinformationen
Compliance: Sicherheit	Sichere Umgebung für Prozessbeteiligte	Kollisionsvermeidung
Compliance: Umwelt	Keine vermeidbare Umweltbelastung	Immissionsmessung
Trennung unterschiedlicher Materialien	Homogene Stoffströme für nachgelagerte Recyclingprozesse	Vereinzelungsgrad
Werterhalt von Funktionsgruppen	Komponenten zur Wieder- oder Weiterverwendung, Baugruppen für Remanufacturing oder Second Life	Werterhaltungsgrad Nachfrage
Informationsmanagement	Bidirektionaler Austausch produkt- und prozessrelevanter statischer und sensorischer Informationen	Übertragungsprotokolle Sensorische Genauigkeit
Lernfähigkeit	Verbesserung der Prozessfähigkeit für spezifische Bauteile auf Grundlage eines systemimmanenten Lernverhaltens	Gradienten für Demontageeffizienz

Die finale Definition der Systemanforderungen auf Basis der notwendigen Funktionen hat direkte Konsequenzen für die technische Implementierung in den Modulen des Demontagesystems. Die Anforderungen werden daher wie folgt in den wichtigsten Hauptgruppen zusammengefasst beschrieben:

Demontageplanung: Das System soll in der Lage sein, den vollständigen Ablauf einer Demontageoperation autonom zu planen. Dafür sollen produktindividuelle Entscheidungen bis auf Bauteilebene getroffen werden, die die Festlegung der Verwertungsoption und eine Bestimmung des Demontagesgrades erlauben. Grundlage dieser Entscheidung sollen statische Stamm- und Lebenszyklus-Daten sowie direkt erfasste bauteilindividuelle Zustandsdaten sein. Eine nach den Zieldimensionen der Nachhaltigkeit ausgewogene Entscheidungsgrundlage ist zu berücksichtigen. Die Demontagesequenzplanung soll diese Entscheidungsergebnisse sowie Vorrangrelationen aus der Produktstruktur berücksichtigen. Die Planungsergebnisse sollen in der benötigten Art und Weise an die ausführenden Systembestandteile oder Mitarbeiter übergeben werden. Für unbekannte Produkte, Varianten oder Zustände soll die Möglichkeit des Anlernens durch einen Mitarbeiter bestehen. Ferner soll das System in der Lage sein, die Ablaufplanung durch ein immanentes Lernverhalten stetig zu verbessern.

Demontageausführung: Die Ergebnisse des Planungsprozesses sollen in standardisierter und reproduzierbarer Form von der Ausführungseinheit verarbeitet werden. Das Systemkonzept soll unterschiedliche Demontagestrategien und Werkzeugkonfigurationen berücksichtigen können. Wichtige Zielgrößen wie die Demontageeffizienz sollen durch Messgrößen wie die Demontagezeit evaluiert und verbessert werden können. Im Rahmen der Ausführung sollen die Prozessschritte transparent kommuniziert und mit einer Werkerführung visualisiert werden. Die Ausführung des Demontagekonzeptes muss vor dem Hintergrund der Qualifikationsstufen der Mitarbeitenden möglich sein. Komponenten sollen bei der Ausführung bestimmungsgemäß behandelt und im Fall höherer Verwertungsstufen in ihrer funktionellen Integrität nicht beschädigt werden. Vereinzelte Komponenten für das stoffliche Recycling sollen nach Möglichkeit sortenrein gesammelt werden. Anforderungen an die Sicherheit der Mitarbeitenden sowie den Umweltschutz sind bei der Auslegung der konkreten Anlagenkonzepte zu berücksichtigen.

Informationsmanagement: Für die Bewältigung multidimensionaler Produktvielfalt soll im Rahmen eines auf die Kreislaufwirtschaft ausgerichteten Informationsmanagements ein standardisierter Austausch von statischen und sensorischen Informationen erfolgen. Das Konzept soll den Vorteil der Demontage nutzen, das Produkt im Verwertungsprozess erstmalig physisch evaluieren zu können. Zu diesem Zweck soll eine optische Erfassung des Produktzustandes erfolgen, die zusammen mit den Lebenszyklusdaten eine ganzheitliche Bewertung des individuellen Produktzustandes ermöglicht. Standardisierte Schnittstellen zu externen Informationssystemen erlauben dabei den Austausch zwischen unterschiedlichen Stakeholdern der Kreislaufwirtschaft und die dynamische, bidirektionale Kommunikation von Produkt- und Prozessinformationen.

Technische Problemstellungen sind in diesem Sinne konkrete Funktionalitäten, die aus den Anforderungen ableitbar sind und eine Umsetzungsaufgabe bedeuten. Nach dem im Folgekapitel beschriebenen Entwurf eines Prozesses für die automatisierte Demontage können aus diesen Anforderungen konkrete Ansprüche an die jeweiligen Systemmodule formuliert werden. Die Entwicklung dieser Module ermöglicht die Untersuchung der Forschungshypothesen in direkter Folge aus den technischen Systemanforderungen.

4.2 Prozessentwurf

Auf den in Kapitel 4.1 definierten Anforderungen aufbauend soll in diesem Abschnitt ein Prozess-Framework für eine Systemarchitektur zur hybriden Demontageautomatisierung entwickelt werden. Neben den allgemeinen produkt- und materialflussbezogenen Prozessschritten wird ebenfalls der Informationsprozess näher analysiert, da dieser einen großen Einfluss auf die Interaktion und das Funktionsprinzip der Systemagenten hat. Als Ergebnis wird ein Prozess-Framework präsentiert, dass die erforderliche Systemarchitektur zur Konzeptrealisierung begründet.

Für die Automatisierung der Demontage werden im Rahmen der Einführung von Techniken der kognitiven Robotik bei *Vongbunyong et al.* [78] bereits grundsätzlich erforderliche Prozessstrukturen festgelegt. Die Aufteilung der unterschiedlichen Verantwortungsbereiche erfolgt entlang des Prozesses in ein Planungsmodul (*Cognitive Robotics Module*), ein Bilderfassungssystem zur Informationsgenerierung bei unbekannten Bauteilen sowie einem aus einem Industrieroboter mit Schneidwerkzeug bestehenden *Operation Module*. Die Berücksichtigung dieses generellen Aufbaus aus Planungs-, Wahrnehmungs- und Ausführungseinheit soll daher auch bei der Gestaltung der Systemarchitektur im Prozess-Framework verwendet werden. In der genannten Arbeit wird darüber hinaus ein generalisierter Ablaufplan verwendet, mit welchem in Form eines *trial-and-error* Ansatzes die Demontage unter Aufsicht und Hilfestellung eines Mitarbeiters im Fall eines Misserfolgs durchgeführt wird. Diese für eine spezifische Produktart entwickelte Vorgehensweise unter Verwendung symbolischer KI im Bereich der Bilderkennerung wird jedoch nicht weiterverfolgt, da die flexible Einsetzbarkeit in einem breiten Produktspektrum sowie der Anspruch an ein ganzheitliches Informationsmanagement so nicht zu verwirklichen sind. Neben diesem aufgabenorientierten Blick auf den Demontageprozess ist die ablaforientierte Beschreibung in vielen der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Konzepte die Grundlage für die Gestaltung der Demontage.

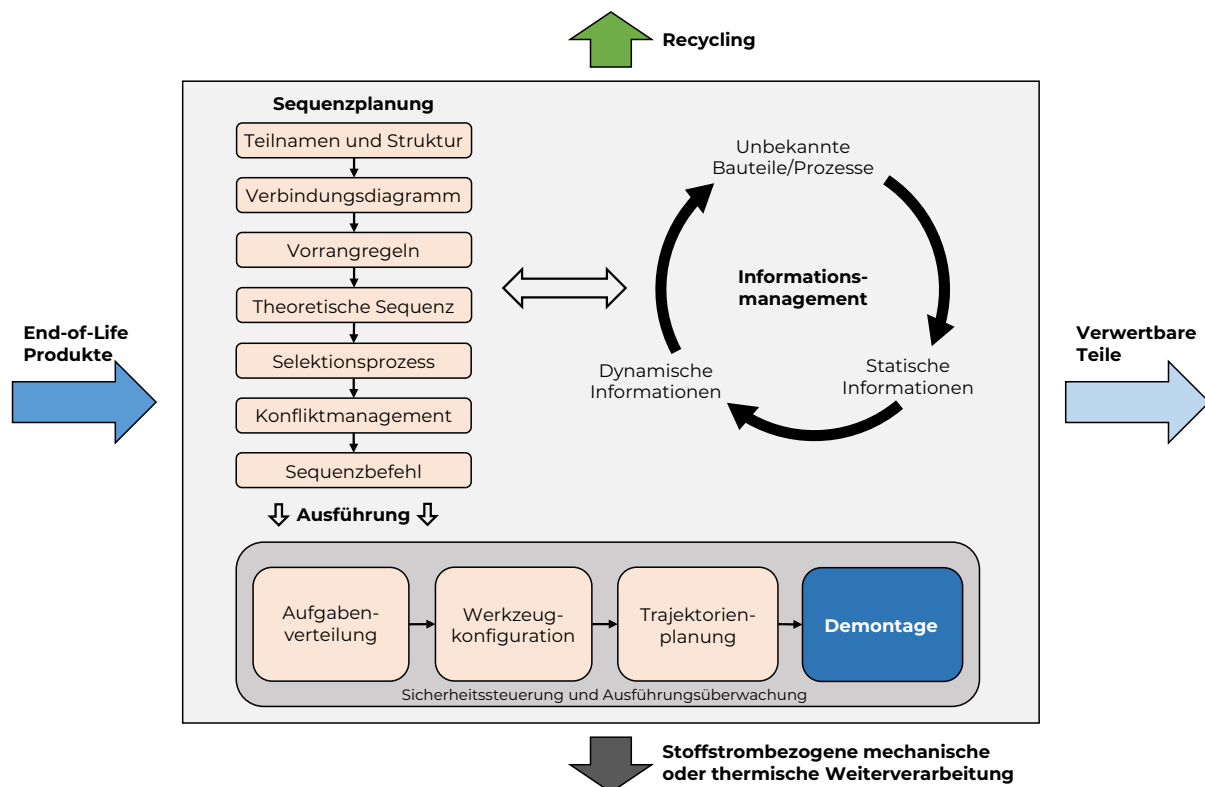


Abbildung 4.3: Grundlegender Prozess der selektiven, hybriden Demontage mit Robotern

In Abbildung 4.3 ist der grundlegende Prozess einer produktflussorientierten, hybriden und selektiven Demontage dargestellt. Die zentrale Vorgehensweise zur Bestimmung der Zielsequenz folgt dabei der Methodologie nach *Kara et al.* [186], wobei der Prozess der Demontageplanung die tatsächliche Sequenzplanung mit einschließt. Hierbei wird zuerst die theoretisch mögliche Vorgehensweise einer vollständigen Demontage mit Hilfe der Verbindungsdiagramme und Vorrangregeln bestimmt und dann ein Selektionsprozess in Bezug auf die eigentlichen Zielkomponenten für die selektive Demontage durchgeführt. Dieser Ansatz verursacht zusätzliche Arbeit durch die vorangehende Planung der theoretisch maximal möglichen Demontage, erleichtert jedoch die Planung mit Selektion, da die konkrete Sequenz eine Teilmenge der Gesamtplanung darstellt, wobei auch Konflikte hinsichtlich strukturbedingter Vorrangrelationen auftreten können. Die so ermittelte Sequenz ist Bestandteil des Ausführungsbefehls an den operativen Anlagenteil, beispielsweise Roboter und Werkzeugmodul. Nach der Aufgabenverteilung und Konfiguration erfolgt mit der Planung der physischen Trajektorie der letzte Schritt auf dem Weg zur Ausführung der Demontage. Der Informationsaustausch in Bezug auf statische Produktdaten und dynamische Zustands- und Umweltinformationen muss sowohl während der Planungsprozesse als auch bei der Ausführung kontinuierlich stattfinden und kann Elemente eines maschinellen Lernverhaltens beinhalten. Die unterschiedlichen Verwertungsziele der Demontage von Altprodukten sind ferner durch das *Recycling* oder die mechanische oder thermische Weiterverarbeitung sowie die weitere Verwertung (z. B. durch *Reuse* oder *Remanufacturing*) bestimmter Komponenten benannt.

Im Kontext einer hybriden Demontage liegen die praktischen Konsequenzen dabei vor allem im Bereich der Ausführungsplanung [98]. Die Verteilung der Aufgabenanteile und die Überwachung der Sicherheitsanforderungen zwischen einem oder mehreren Robotern und Menschen müssen koordiniert und in ihrer Ausführung sichergestellt werden. So ist es beispielsweise erforderlich, die Planung der Trajektorien im Arbeitsraum mit den Hindernissen der Umgebung abzugleichen und dynamisch auf die Kooperationsumgebung mit dem Menschen abzustimmen. Diese erforderliche Kenntnis der Arbeitsumgebung entspricht ebenfalls den Grundbedingungen für die Arbeit intelligenter Agenten nach *Russell et al.* [139]. Nach *Zheng et al.* [187] sind überdies bei der Prozessplanung die Berücksichtigung der Dimensionen Produkt, Equipment, Technologie und Prozess in Form strukturierter Datenquellen zwingend erforderlich, um eine algorithmische Planung zu realisieren. Diese Daten müssen zielbezogen abgerufen und anwendungsgerecht fusioniert werden, um als Grundlage für Optimierungsberechnungen hinsichtlich Pfad- und Ausführungsplanung zu dienen. Der Aufbau einer Kontrollarchitektur, die in der Lage ist auf Basis dieser Informationen automatisierte Demontageabläufe zu planen, kann dabei in die Generierung einer Sequenz- und einer Operationsplanung aufgeteilt werden, wobei die grundlegende Operationsplanung mit Hilfe von statischen Produkt- und Prozessdaten erfolgt und die Ausführung die tatsächlichen Daten der Anlagenmodule und Sensorik einbezieht [99, 188]. Eine Erweiterung dieses Prozessmodells ist darüber hinaus durch den Einsatz von ML-Methoden, wie dem bestärkenden Lernen möglich, um Unsicherheiten durch vom System auf Grundlage eines Lernprozesses synthetisierbaren Wissens zu verbessern [189].

In Bezug auf die zur Demontage erforderlichen Informationsprozesse besteht in der Wissenschaft zurzeit keine umfassende Darstellung möglicher Abläufe. Auf Basis der im Rahmen dieser Forschung bei Industriepartnern aufgenommenen Daten, ist in Abbildung 4.4 der Ablauf anhand eines generalisierten Demontageprozesses gezeigt. Für fundierte Entscheidungen im Rahmen einer selektiven Demontage in einem Prozess-Framework mit integriertem Informationsmanagement müssen neben den strukturell bekannten und visuell erfassbaren Informationen auch Verschleißdaten, die aktuelle Marktsituation für Rohstoffe oder Gebrauchteile sowie Informationen aus Produktentwicklung und Produktion in die Planungsprozesse einfließen. Eine überwachte, durch menschliche Prozesssteuerer ausgeführte Entschei-

dung ist in diesem hochkomplexen und dynamischen Umfeld nicht bauteilindividuell mit einem vertretbaren Aufwand realisierbar. Es ist daher eine Automatisierung der Entscheidungsvorgänge im Verantwortungsbereich des Planungsmoduls erforderlich, was die Vernetzung der physischen Demontagezelle mit einer übergeordneten Informationsquelle in Form eines weitläufig verteilten cyberphysischen Systems erforderlich macht. Dieser Ansatz erfüllt die gestellten Anforderungen an die Demontageplanung und bietet die Möglichkeit eine Lösung zu schaffen, die eine effektive und effiziente Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeitsanforderungen in einem global vernetzten Lieferkettenkonzept wie der Kreislaufwirtschaft erlaubt.

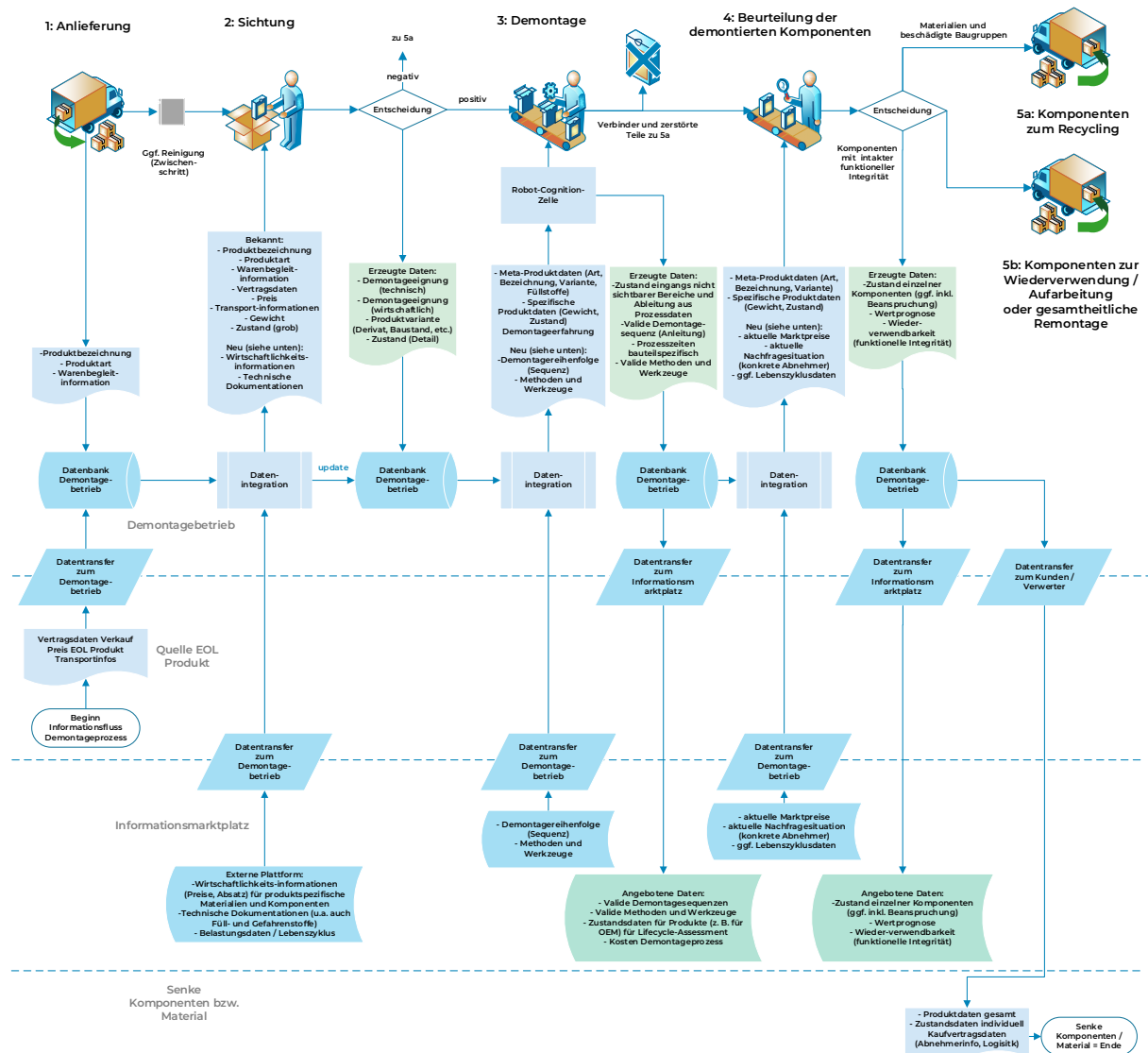


Abbildung 4.4: Informationsfluss im Demontageprozess

Bei Betrachtung der in Abbildung 4.4 dargestellten Informationsflüsse über dem Demontageprozess aus Abbildung 2.6, kann auf der Datenebene zwischen bekannten, benötigten (neuen) und erzeugten Datensätzen differenziert werden. Dabei hat jeder Prozessschritt spezifische Attribute, die für die erfolgreiche Durchführung erforderlich sind. Ein Informationsmarktplatz als Quelle externer benötigter Informationen ist in dieser Prozessdarstellung bereits enthalten, da diese Form einer übergeordneten Schnittstelle ebenfalls das Angebot erzeugter Daten in einer vernetzten Kreislaufwirtschaft ermöglicht. Im Demontagebetrieb ist darüber hinaus die Sicherung der vorhandenen Informationen auf einem Datenbank-

system erforderlich, welches direkt und ohne zusätzliche Transferprozesse mit der technischen Demontageeinrichtung verbunden werden kann. Die Integration externer Informationen und neu gewonnener Daten erfordert ein standardisiertes Datenmodell, dass den Austausch zulässt und bidirektional für die Verwendungszwecke geeignet ist (z. B. Verwendung im Demontageprozess oder Angebot der Daten für externe Stakeholder). Entscheidungsprozesse die Interaktion mit diesem externen Datenmarktplatz betreffend werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Der Informationshandel als Subprozess erfordert die Berücksichtigung zahlreicher Akteure und eine tiefgehende Modellierung des Informationswertes sowie des übergeordneten Wirtschaftssystems. Weiterführende Arbeiten hierzu finden sich z. B. bei *Lawrenz et al.* [190].

Zusammenfassend können damit folgende Kriterien für einen Prozessentwurf eines automatisierten Demontagesystems festgelegt werden:

- Strukturelle Gliederung in aufgabenbezogene Teilbereiche/Module
- Berücksichtigung der erforderlichen Ablaufschritte für eine erfolgreiche Demontage
- Planung, Ausführung und Informationsmanagement sind zentrale Aufgaben
- Berücksichtigung unterschiedlicher Verwertungsziele und Entscheidungsprozesse
- Verbesserungsmöglichkeiten durch die Integration von maschinellen Lernalgorithmen
- Standardisierter Informationsaustausch und Systemkommunikation

Die Einteilung in aufgabenbezogene Teilbereiche (Wahrnehmung, Entscheidung, Ausführung) ermöglicht die Entwicklung zielgerichteter Lösungen nach den jeweils dafür geeigneten *State-of-the-Art* Verfahren sowie die Implementierung gemäß den Grundsätzen verteilter Systeme und des *Edge Computing*⁹. Die Funktionsprinzipien des Gesamtkonzeptes müssen dabei durch standardisierte Schnittstellen und ein übergreifendes Informationsmanagement sichergestellt werden.

Das im Ergebnis konzeptionierte Prozessmodell für die selektive, hybride Demontage mit Hilfe von Robotertechnik ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Es besteht aus drei Modulen, deren Aufgaben prozessorientiert verteilt sind und im Zusammenspiel die Demontage ermöglichen. Das Hauptmodul bildet der **Robot Cognition Processor** (RCP), welcher die zentrale Steuerungseinheit des Demontagesystems darstellt. Die Informationskoordination und -synthese sowie die Planung einer Demontagesequenz auf Grundlage produktindividueller Entscheidungen sind der Aufgabenkern des RCP. Neben der Steuerungsdomäne sind weiterhin zwei Module enthalten, die in der direkten Demontageumgebung, d. h. mit dem EoL-Produkt und den Mitarbeitern interagieren. Für die sensorische Wahrnehmung auf Basis optischer Identifikation, Detektion und Bewertung der Bauteile sowie für die Arbeitsraumüberwachung ist die **System Perception Unit** (SPU) zuständig. Die tatsächliche Demontagedurchführung und Pfadplanung obliegt der **Disassembly Execution Unit** (DEU), dem Systembestandteil, in dem Roboterarm, Werkzeuge und Mitarbeiter für die Ausführung der Demontageplanung wertschöpfend tätig werden. Um die beschriebenen Informationsmanagement-Prozesse zu berücksichtigen, soll das RCP-Konzept mit einer übergeordneten Datenbasis, dem Informationsmarktplatz, verknüpft werden [38]. Dieser stellt im Rahmen dieser Forschungsarbeit sowohl Quelle als auch Senke für externe Informationen dar.

⁹ Edge Computing bezeichnet die Ausführung von Berechnungen am *Rande des Netzwerks* bzw. der Cloud. Datenströme werden hier möglichst nah am Ort des Entstehens bzw. des Bedarfes verarbeitet, was eine effizientere Nutzung von Kommunikationsarchitekturen ermöglicht. Diesem Prinzip folgend entstehen dezentrale Module, die mit einem übergeordneten Netzwerk in Verbindung stehen und z. B. im Rahmen der Industrie 4.0 intelligente, verteilte Lösungen ermöglichen. Weitere Informationen zu Edge Computing und den Wechselwirkungen mit Cloudsystemen sind besonders in [191] anschaulich dargestellt.

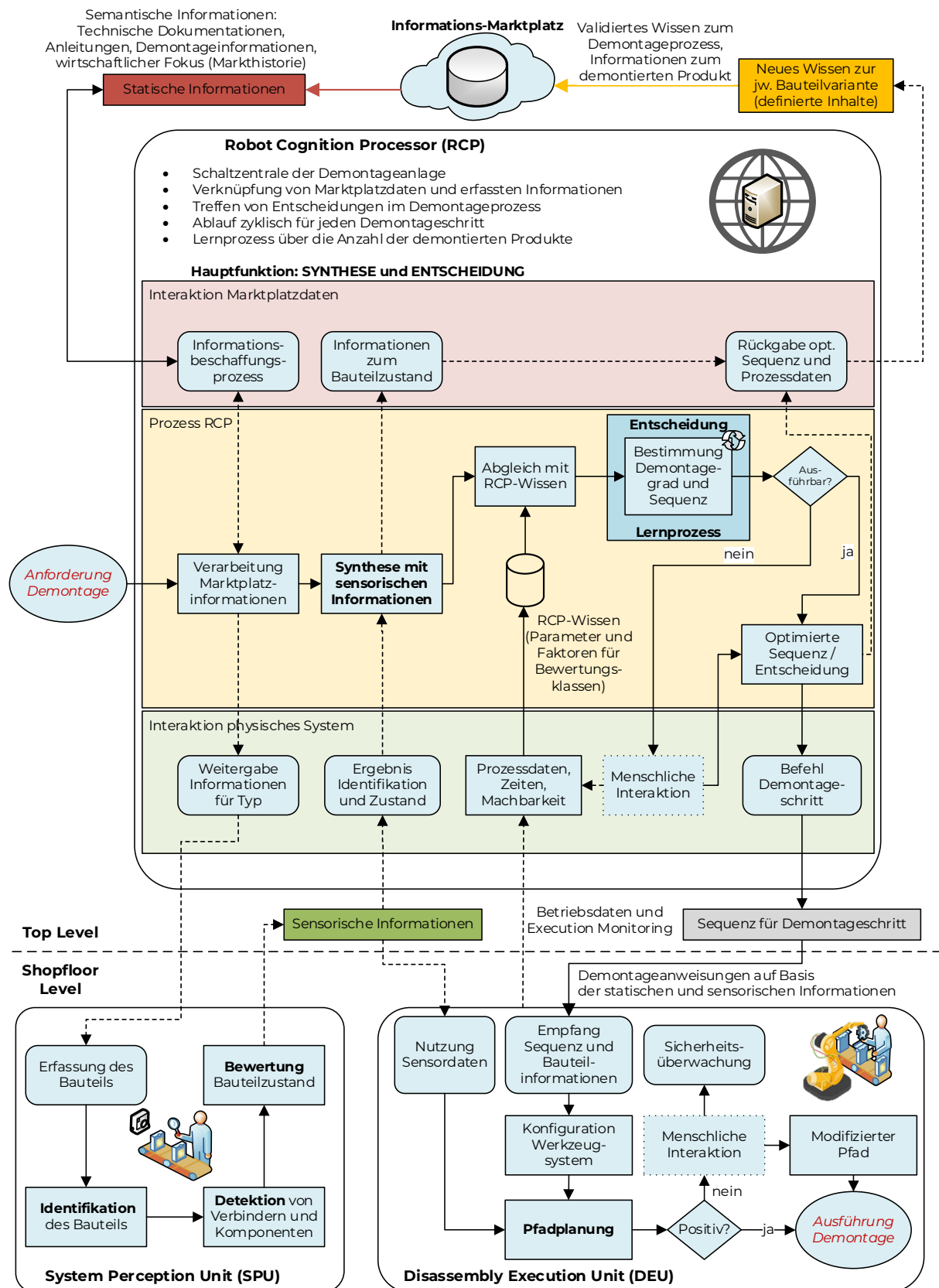


Abbildung 4.5 Prozessmodell der hybriden selektiven Demontage mit Hilfe kognitiver Robotik

Der Ablauf wird in Abbildung 4.5 veranschaulicht, wobei sowohl zwischen der Form der Prozessblöcke als auch der Verbinden in Bezug auf deren Verantwortlichkeit unterschieden werden kann. Eckige Blöcke symbolisieren wertschöpfende Teilprozesse im Rahmen der Kernfunktionen, wohingegen abgerundete Blöcke Transfer- oder Informationsprozesse darstellen. Menschliche Interaktionsprozesse sind ebenfalls besonders gekennzeichnet. Durchgezogene Linien verbinden den direkten, minimal erforderlichen Ablauf zwischen Anforderung und ausgeführter Demontage. Gestrichelte Linien zeigen die Übermittlung von Informationen, die für die Durchführung genutzt werden oder als Ergebnis der Demontage an externe Senken weitergegeben werden können. Kommunikations- und Informationsprozesse sind in dieser Darstellung von zentraler Bedeutung und ein Schlüsselfaktor für die erfolgreiche Implementierung einer hybriden Demontage.

Der Prozess beginnt mit der Demontageanforderung an das Gesamtsystem. In einem ersten Schritt werden im RCP im Rahmen der Interaktion mit der externen Datenbasis die verfügbaren statischen Informationen für das betreffende Produkt abgerufen. Diese Informationen werden lokal verarbeitet und relevante Anteile, wie z. B. Strukturinformationen an die SPU weitergegeben. Diese identifiziert daraufhin das Bauteil, detektiert die Position von Komponenten und Verbindern und bewertet den Bauteilzustand anhand optischer Kriterien. Das Ergebnis dieses Wahrnehmungsprozesses wird an das RCP zurückgegeben und mit den statischen Informationen zu einem holistischen, produktindividuellen Datensatz verknüpft. Informationen zum tatsächlichen Bauteilzustand können hier bereits an externe Stakeholder weitergegeben werden. Der individuelle Datensatz wird in einem Zwischenschritt mit dem RCP-Wissen zu früheren Demontagevorgängen der gleichen Produktvarianten abgeglichen, um auf bereits vorhandenes Prozesswissen zurückgreifen zu können. Die Hauptfunktion des RCP stellt ein zyklischer Entscheidungsprozess für jedes Bauteil dar, in welchem das Verwertungsziel und damit die selektive Demontagesequenz der Komponenten festgelegt wird. Hierdurch ergibt sich ebenfalls der anzustrebende potenzielle Demontagegrad. Dieser Prozessschritt wird zyklisch für jede Bauteilebene wiederholt und mit einer steigenden Anzahl von Demontagevorgängen durch ein Lernverhalten stetig verbessert. Ein Abgleich dieser optimierten Sequenz mit den Vorrangbedingungen der Produktstruktur stellt den folgenden Schritt dar. Hier wird entweder im Fall einer positiven Prüfung die optimierte Sequenz als Demontagebefehl an die DEU weitergegeben oder es besteht im Fall eines Konflikts die Möglichkeit für den Anwender durch Interaktion mit dem System das Problem zu lösen. Diese Lösung wird daraufhin ebenfalls dem Prozesswissen des RCP hinzugefügt. Optimierte Demontagesequenzen und Prozesswissen können bereits zu diesem Punkt an die übergeordnete Datenbasis zurückgegeben werden, um dort anderen Stakeholdern der Kreislaufwirtschaft zur Verfügung zu stehen. Diese auf Grundlage der statischen und sensorischen Informationen bestimmte Demontageanweisung wird von der DEU empfangen. Die DEU konfiguriert das Werkzeugsystem in der für die Ausführung der Anweisung erforderlichen Weise und initiiert die Pfadplanung des Roboterarms unter Berücksichtigung der Sensordaten aus der SPU. Ist eine Ausführung ohne Konflikte in der realen Umgebung möglich, wird die Demontage ausgeführt. Ist dies nicht der Fall, besteht die Möglichkeit im Rahmen der MRK-Anwendung den Pfad durch einen Mitarbeiter so zu modifizieren, dass die Ausführung möglich ist. Die aus der Ausführung hervorgehenden Prozessdaten sowie eine Mitteilung über den aktuellen Stand der Demontage werden im Rahmen des *Execution Monitorings* an den RCP zurückgegeben. Der Demontageprozess ist damit erfolgreich abgeschlossen.

4.3 Aufbau und Systemarchitektur

In diesem Abschnitt wird das im Prozessentwurf entwickelte technische System detailliert beschrieben und die Funktionsweise der einzelnen Module dargestellt. Die drei Systemagenten aus Abbildung 4.5, der *Robot Cognition Processor* (RCP), die *System Perception Unit* (SPU) und die *Disassembly Execution Unit* (DEU) werden in den Unterkapiteln gemäß der PEAS-Beschreibung (Performance, Environment, Actuators, Sensors) [139] eingeführt, und anhand der spezifischen Anforderungen ausgelegt. Die zu entwickelnden Agenten stellen damit den Kern eines autonom planenden, hybriden Demontagesystems dar. Die Beschreibung umfasst die technischen Wirkungsprinzipien, die entwickelten Algorithmen und die Prozesseingangs- und Ausgangswerte sowie die benötigten und erzeugten Informationen. Die Handlungen der Agenten sollen dabei jeweils allgemein modelliert werden, um die Anwendung des Konzeptes in einem weiten Feld technischer Prozesse, auch über die Demontage hinaus, zu erlauben.

In Abbildung 4.6 ist die Zusammenfassung der erforderlichen Modulspezifikationen der Agenten schematisch dargestellt. Der übergeordnete Informationsmarktplatz ist als Schlüsselkonzept des *Recycling 4.0* Forschungsansatzes eine wichtige Voraussetzung für die beschriebenen Funktionen und auch das konzipierte Demontagesystem versteht sich als Teil dieses Ökosystems. Um jedoch den Anspruch eines generalisierbaren Forschungsergebnisses auf Ebene des Demontagesystems sicherzustellen, können die wesentlichen Funktionen aus diesem Konzept (Informationsbereitstellung, Informationsverarbeitung und Wissensmanagement) herausgelöst und in ihrer Gesamtheit als eine als erfüllt angenommene Voraussetzung in Bezug auf die Schnittstellenfunktionen betrachtet werden. Die Entwicklung dieses Frameworks ist daher nicht Teil dieser Arbeit. Eine genauere Analyse dieser Schnittstellen und des standardisierten Kommunikationskonzeptes erfolgt in Kapitel 4.4. Die einzelnen Agenten auf der Ebene des Demontagesystems sind ebenfalls mit ihren Kernfunktionen dargestellt. Die Realisierung dieser wird in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

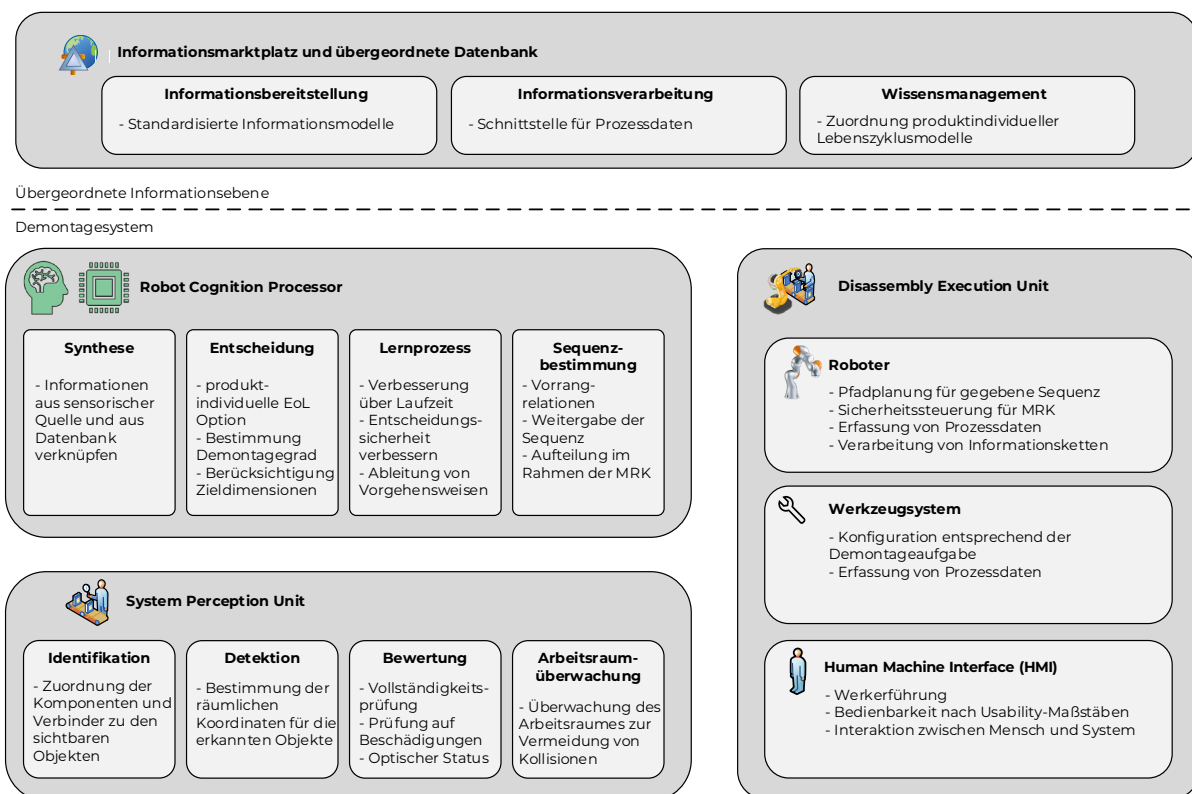


Abbildung 4.6: Funktionsspezifikationen der Systemagenten im Kontext des Gesamtsystems

Um einige generelle Probleme von intelligenten Systemen im Rahmen der Interaktion mit deren Umgebung zu vermeiden, müssen Annahmen getroffen werden. Diese sollen für die Entwicklung des Gesamtsystems gültig sein. Die Vorgehensweise ist erforderlich, da die eingesetzten Logiken und Algorithmen ansonsten keine reproduzierbaren Ergebnisse ermöglichen würden. Bei der Formulierung soll darauf geachtet werden, dass nicht mehr Annahmen getroffen werden, als mindestens erforderlich sind (das Prinzip von *Ockham's Rasiermesser*, siehe [124]). Die auf diese Weise entwickelten Lösungen haben durch die simpleren Ausgangsbedingungen überdies ein größeres Generalisierungspotenzial. Eine grundlegende Annahme soll beispielsweise die *Closed-World-Assumption* (CWA) sein. Dieser und dem *Satz vom Widerspruch* (eine Aussage kann entweder *wahr* oder *falsch* sein) folgend ist es möglich, aus einer Menge individueller Aussagen zu einer Gesamtmenge zu folgern, dass die allgemeine Aussage *wahr* oder *falsch* ist. Ein Beispiel: Das optische System erkennt keine Schrauben von Typ X. Auf Grundlage der CWA kann das System darauf schließen, dass es keine Schrauben von Typ X gibt und dementsprechende Anforderungen dahingehend für Folgeprozesse beantworten. Würde eine Schraube von Typ X erkannt, wäre die Abfrage in der Folge hingegen positiv, d. h. Schlüsse können durch zyklische Abfragen revidiert werden und sind damit *nichtmonoton* [122]. Dies erlaubt das direkte Schlussfolgern situationsabhängiger Aussagen in Agentensystemen aus der vorhandenen Menge an veränderlichen Teilm Informationen in unsicherem Umfeld [141].

In Bezug auf das Informationsmanagement sollte grundsätzlich angenommen werden, dass die für den Betrieb erforderlichen Minimalinformationen bekannt sind und beispielsweise ein standardisiertes Produktmodell, welches Lebenszyklusdaten enthält, vorliegt. Um für die spätere Evaluation des Systemkonzeptes eine funktionierende Umgebung zu schaffen, wird die Implementierung am Beispiel der Demontage einer Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeuges prototypisch umgesetzt (Abschnitt 4.5). Die Erfüllung der notwendigen Voraussetzungen kann bei der Integration in bestehende Systeme problematisch werden, was in Kapitel 6 näher betrachtet wird.

Das Systemkonzept ist ausführungsseitig als MRK-Anwendung mit autonomer Planung entworfen. Sollte eine spezifische Funktion durch die Systemagenten nicht erfüllt werden können, kann der menschliche Bediener diese im Rahmen der Grenzen seiner Fähigkeiten ersetzen. Zu diesem Zweck sollten alle Module die Möglichkeit der direkten Manipulation berücksichtigen und der menschliche Bediener jederzeit das System direkt beeinflussen können. Das dafür erforderliche Interface stellt einen Bestandteil der DEU dar und ist in Abschnitt 4.3.3 beschrieben. Weitere technische Problemstellungen werden im Kontext der Anforderungen für jedes Modul in den jeweiligen Unterkapiteln rekapituliert.

4.3.1 Der Robot Cognition Processor (Steuerung)

Beim *Robot Cognition Processor* (RCP) handelt es sich um den wichtigsten Systemagenten der hier konzeptionierten Demontageanlage. Die Bezeichnung *Prozessor* (Lat. *Umformer*) beschreibt in der Informationstechnik ein logisch programmierbares Steuerungselement zur Verarbeitung von Daten und zur Weitergabe von Befehlen [192]. Diesem Verständnis folgend stellt der RCP das zentrale Steuerungselement des Demontagesystems dar. Da das entworfene Konzept primär auf einem ganzheitlichen Informationsmanagement im Kontext einer integrierten Kreislaufwirtschaft beruht, ist der RCP als Schnittstelle zwischen externen Informationsquellen und der physischen Demontageanlage konzipiert. Die statischen Informationen, die über die Datenbank verfügbar sind, werden um die durch die SPU gewonnenen Informationen in einem standardisierten Informationsmodell für jede abgebildete Komponente zusammengefasst. Auf Grundlage dieser Daten entscheidet der RCP bauteilindividuell über die Verwertungsoption im weiteren kreislaufwirtschaftlichen Prozess. Aus diesen Entscheidungen ergibt sich überdies auch die jeweilige optimale Demontagetiefe. Mittels ML-Algorithmen wird das Planungsergebnis des RCP kontinuierlich verbessert. Eine Sequenzplanung auf Grundlage der getroffenen Entscheidungen und der aus dem Produktmodell bekannten Vorrangrelationen wird an die DEU weitergegeben und führt damit zur erfolgreichen Demontageoperation. Der RCP gibt überdies das gewonnene Produkt- und Prozesswissen an die übergeordnete Datenbasis zurück (bzw. an den Informationsmarktplatz im *Recycling 4.0* Konzept). Auf diese Weise trägt der RCP durch informationelle Wertschöpfung und die mögliche Verbreitung von Informationen und Wissen zwischen verschiedenen Stakeholdern zu einer möglichen Verbesserung der Wertschöpfungsketten in der Kreislaufwirtschaft bei.

In Abgrenzung zu bisherigen agentenbasierten Konzepten, z. B. von *Vongbunyong* [76] oder *Jungbluth* [80], zeigt das hier vorgestellte Konzept die Fähigkeit vertikal mit anderen Teilnehmern der Kreislaufwirtschaft zu kommunizieren und etabliert in diesem Bereich erstmalig eine durchgängige Datenbasis zwischen OEM und Anlagenleitebene im Demontagebetrieb. Weiterhin tragen die neu erlangten Informationen zum Produkt und zu den Prozessabläufen der Demontage zu einer Vergrößerung des spezifischen Wissens bei und können mit anderen Stakeholdern ausgetauscht werden. Entscheidungen vor dem Hintergrund einer im Sinne der Nachhaltigkeit begründeten Zielsetzung ermöglichen eine individuelle Festlegung des Demontagegrades, was vor allem in variantenreichen Produktgruppen neue Perspektiven der Wirtschaftlichkeit eröffnet, die durch eine entkoppelte Sequenzplanung umgesetzt werden.

Der RCP hat damit folgende Hauptfunktionen:

- **Synthese der Informationen (Informationsmanagement),**
- **Entscheidung über den Demontagegrad,**
- **Lernprozess zur Ergebnisverbesserung und**
- **Optimierte Sequenzplanung.**

Die Informationssynthese beschreibt die Verknüpfung der abrufbaren Stamm- und Lebenszyklusdaten mit den optischen Informationen sowie die Möglichkeit, validiertes Prozesswissen an diese Modelle zurückzugeben. Durch die Interpretation der gewählten Ontologie schafft dies die Grundlage mit diesen Daten ein Entscheidungsergebnis über die Verwertungsoption zu bestimmen, woraus sich der Demontagegrad des Bauteils ableiten lässt. Da sich sowohl das gesamtwirtschaftliche Umfeld als auch unternehmensspezifische Bedingungen verändern können, ist es wichtig, dass das Gesamtkonzept einen Lernprozess abbildet, anstelle eines starren, deterministischen Regelsystems. Schlussendlich muss der RCP die optimierte Demontageentscheidung in einer optimierten Sequenz unter Berücksichtigung der Vorrangrelationen und des Ausführungsstatus vorangegangener Aktionen weitergeben.

Tabelle 4.4: PEAS-Beschreibung des RCP

Agent	Performance Measure	Environment	Actuators	Sensors
Robot Cognition Processor (RCP)	Accuracy (Genauigkeit) Entscheidungszeit Kommunikationslatenzen Sequenzerfolg Anpassungsgradient	Robotersystem Externe Wissensbasis Interne Datenbank Datenverarbeitungs- Algorithmen	DEU	SPU

Die Beschreibung des RCP als Agenten nach der PEAS-Methodik (Tabelle 4.4) verdeutlicht diesen Anspruch. Die DEU als ausführende Einheit kann hier als angesteuerter Aktor und die SPU als verknüpfter Sensor verstanden werden. Damit sind diese Agenten aus Sicht des Gesamtsystems als sekundäre Bestandteile dem RCP nachgeordnet. Die Umwelt des Systems ist observierbar, in dem Sinn, dass alle Informationsquellen (externe Wissensbasis und interne Datenbank) und Senken (Robotersystem als Befehlsempfänger) kontinuierlich berücksichtigt und durch adaptive Datenverarbeitungs-Algorithmen genutzt werden. Eine Auswertung der Systemleistung kann auf die jeweiligen Funktionalitäten bezogen werden. So wird der Entscheidungsalgorithmus anhand der Genauigkeit seiner Klassifizierung (auch unter abweichenden Bedingungen) sowie der benötigten Zeit gemessen werden. Die Latenzen für die Kommunikation im System sind vor allem bei örtlich verteilten Anordnungen relevant. Der Erfolg einer bestimmten Sequenz in der Ausführung durch die DEU kann ebenfalls als Messgröße für die Qualität der Arbeit des RCP genutzt werden. Der Anpassungsgradient der Gewichtungen des Entscheidungsmoduls ist überdies ein messbarer Indikator zum adaptiven Verhalten unter sich verändernden Bedingungen.

Die in Abschnitt 4.1 genannten Anforderungen an das Gesamtsystem sollen somit den Funktionen zugeordnet und erfüllt werden. Dies schließt die Punkte *Demontageplanung*, *Demontagesequenzplanung*, *Werterhalt der Funktionsgruppen*, *Informationsmanagement* sowie *Lernfähigkeit* ein. Die Handlungen des RCP können daher als Systemagenten wie in Abbildung 4.7 dargestellt modelliert werden.

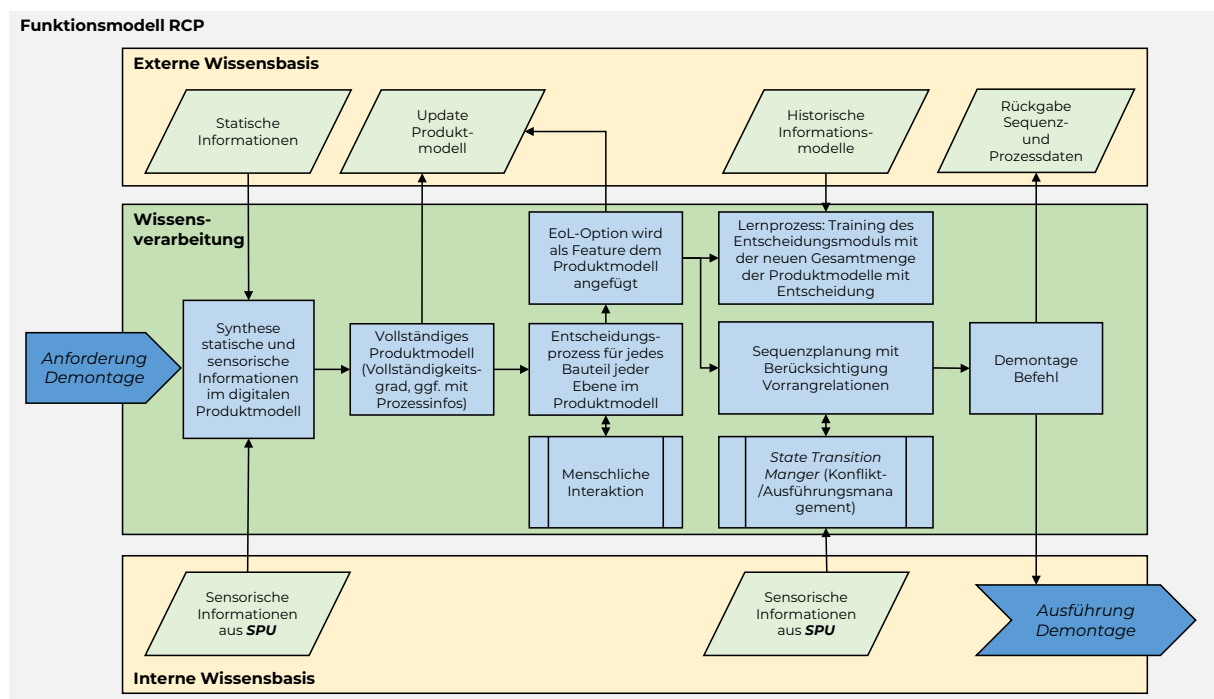


Abbildung 4.7: Funktionsmodell des RCP Prozesses

Dieser Aufbau stellt gleichzeitig die allgemeinen Bestandteile wissensbasierter Systeme mit Wissensbasis und Inferenzstruktur dar [141]. Das Wechselspiel zwischen Datenabfragen und Verarbeitungsaktionen und die Weitergabe der Ergebnisse ist die *kognitive* Leistung des Systemagenten. Eine Besonderheit ist hier die Differenzierung zwischen interner und externer Wissensbasis.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Hauptfunktionen detailliert beschrieben.

Synthese der Informationen (Informationsmanagement)

Die Grundlage der Arbeit des RCP ist ein *holistisches Datenmodell* (siehe [38, 193]). Dieses Datenmodell enthält sowohl Informationen zum Produkt als auch zum Prozess und ist die Eingangsgröße für die Entscheidung und die Sequenzplanung. In Bezug auf die Produktinformationen besteht das Datenmodell aus statischen *Stammdaten*, z. B. Materialzusammensetzung und Strukturinformationen, sowie dynamischen *Lebenszyklusdaten* (z. B. Produktionsdatum, Laufleistung oder auch Preise für Eigentümerwechsel sowie aktuelle Rohstoffpreise). Zur Repräsentation dieses Wissens soll eine standardisierte, prozessorientierte Ontologie eingeführt werden. Die für die syntaktische Umsetzung erforderliche Kommunikationsstruktur im Rahmen des hierfür gewählten Industriestandards *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA) ist in Abschnitt 4.4 beschrieben. In Abbildung 4.8 ist die Struktur des Repräsentationsraumes schematisch dargestellt. Im Rahmen der verwendeten Ontologie wird jedem Produkt eine individuelle Identifikationsadresse zugewiesen. Hierbei kann es sich in der Praxis z. B. um eine Seriennummer handeln. Diese individuelle *Adresse* beschreibt das gesamte Produkt. Dieses ist wiederum prozessorientiert in die enthaltenen Hauptbaugruppen (Produktebene 1), Module (Produktebene 2) und Einzelteile (Produktebene 3) unterteilt. Die Struktur kann dabei beliebig breit und tief werden, was letztlich von dem betrachteten Produkt abhängig ist. Im Idealfall spiegelt die Struktur eine hierarchische Stücklistenstruktur wieder, aus der auch die Vorrangrelationen ersichtlich sind.

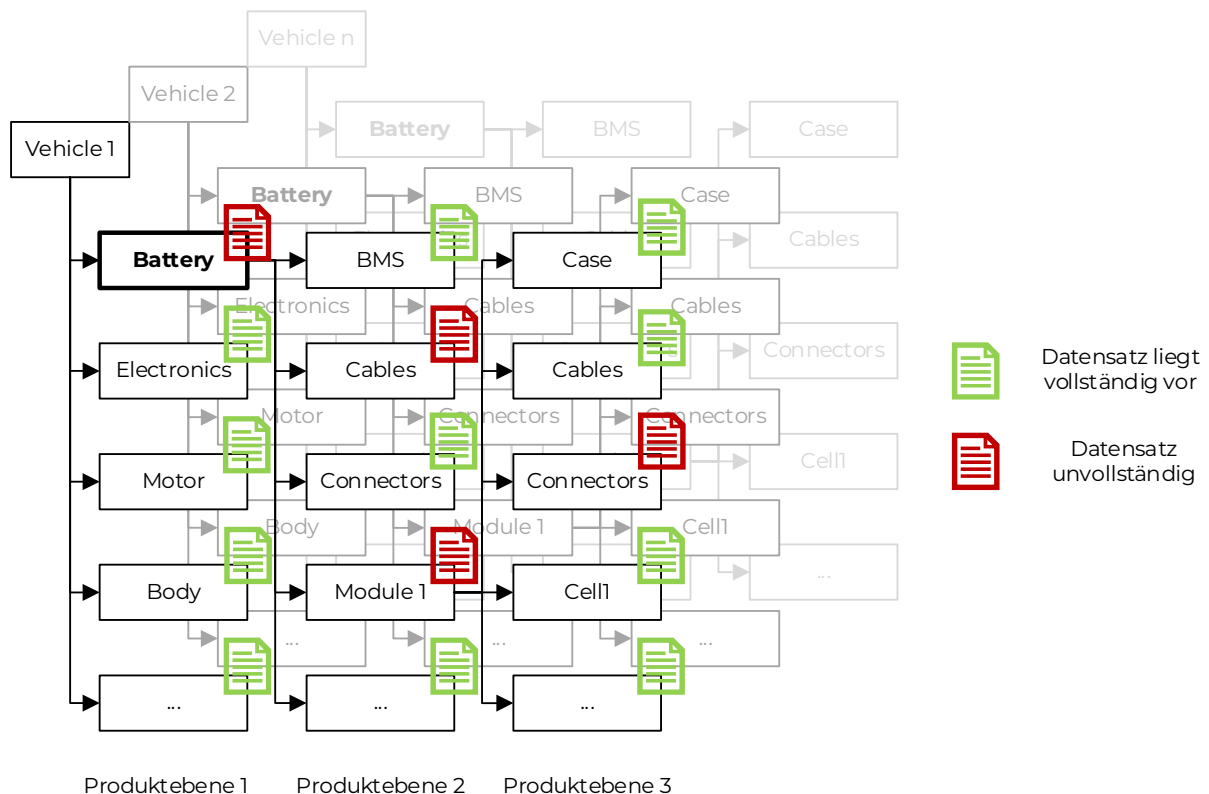


Abbildung 4.8: Beispielhafte Produktstruktur mit Hierarchieebenen und allokierten Datensätzen nach [194]

Für jedes Objekt innerhalb der Struktur ist ein gebündelter Datensatz vorhanden. Dieser Datensatz wird für bauteilspezifische Aktionen aus dem Datenmodell ausgelesen (siehe Abschnitt 4.4). Die Information über die Vollständigkeit des Datensatzes als Quotient der vorhandenen Informationen zu den möglichen Informationen wird auch angegeben. Innerhalb des Modells wird der Vollständigkeitsgrad mit der Hierarchie vererbt, d. h. ein Produktdatensatz kann nur vollständig sein, wenn alle Unterkomponentendatensätze vollständig sind. Auf diese Weise ist es möglich für Ergebnisse im Entscheidungsprozess ebenfalls den Vollständigkeitsgrad als Wirkgröße mit anzugeben.

Da es sich bei der beschriebenen Struktur um ein Lebenszyklus-übergreifendes Modell handelt, wird die Datenstruktur in einer externen, übergeordneten Datenbank abgebildet (d. h. im Informationsmarktplatz [31] im Kontext des *Recycling 4.0* Frameworks). Die Frage, wann und ob der Roboter in einer ökonomisierten Marktplatzstruktur fehlende Daten gegen eine Gegenleistung (Geld oder Informationen) erwirbt, ist ein Forschungsgegenstand der Wirtschaftswissenschaften bzw. aus dem Teilbereich der Entscheidungstheorie (siehe [156]). Da es sich für das Robotersystem um *Entscheidungen höherer Ordnung* handelt und gemäß den formulierten Forschungshypothesen die Entscheidungen zu den Verwertungsoptionen im Vordergrund stehen, wird diese Fragestellung hier nicht näher betrachtet. Es soll deshalb in der Folge davon ausgegangen werden, dass die Akquise von Datenmodellen aus externen Quellen keinen negativen Einfluss auf das Entscheidungsergebnis bezüglich der Demontageoption hat und dass diese Informationen, soweit auf der externen Datenbank vorliegend, auch unter Einhaltung der Regeln einer sicheren Kommunikation abgerufen werden können. Die Bestimmung des *Wertes* einer Information im Kontext des kreislaufwirtschaftlichen Datenhandels wird in [190, 195] betrachtet. Auf Grundlage dessen ist es möglich, auch oben genannte Frage nach den Erwerbsmechanismen des automatisierten Informationsankaufs im Hinblick auf die Auswirkungen auf den Verwertungsprozess zu untersuchen.

Externe Inhalte sind dabei nur über das Datenmodell verfügbar, wohingegen lokale Inhalte, wie z. B. die Bauteilqualität oder Prozessinformationen unabhängig von der externen Datenbasis verfügbar sind. Spezifische lokale Inhalte, wie bauteilindividuelle Sequenzdaten, haben keinen direkten Mehrwert für das Datenmodell aus Sicht der Stakeholder, da der eigentliche Wertschöpfungsprozess – deren Erzeugung – bereits die Zielsetzung der Demontage eröffnet (und ein anderer Stakeholder nicht *dasselbe Bauteil* wiederholt demontieren kann). Darüber hinaus kann ein eigener, lokaler Wissens-Cache als *Prozessgedächtnis* die bereits abgerufenen Datensätze und gewonnenen Informationen auf der RCP-Hardware speichern und so den stationären Betrieb der Demontageanlage im Falle der Nicht-Verfügbarkeit der externen Datenbasis sicherstellen.

Der so gewonnene Datensatz bietet auf diese Weise eine einheitliche Basis für den Entscheidungsprozess über die weitere Verwertung auf einer möglichst umfangreichen Informationsgrundlage. Da der Entscheidungsprozess selbst als quasi-statischer Vorgang betrachtet wird (die Berechnungszeit ist so gering, dass sich keiner der Faktoren währenddessen verändert), muss der Datensatz nicht kontinuierlich mit dem Modell abgeglichen werden. Bei Betrachtung des gesamten Demontageprozesses, ist auch hier der zeitliche Ablauf für die weitere Alterung der Produkte irrelevant und kann daher orientiert an den Prozessschritten aktualisiert werden (z. B. pro Demontageschritt). In Tabelle 4.5 ist schematisch ein gebündelter Datensatz dargestellt, wie er für jedes Objekt innerhalb des Strukturmodells vorliegt. Für jedes Feature existiert im tatsächlichen Datenmodell ein dimensionsloser Wert oder ein boolescher Operator. Da die Kommunikation einem standardisierten Muster folgt, sind alle Operatoren bei der Verarbeitung der Daten auf dem entsprechenden Datentyp mit einer hinterlegten Einheit konfiguriert.

Tabelle 4.5: Allokierete Informationen pro Element des Datenmodells

Feature	Symbol	Beschreibung	Quelle	Abhängigkeit
Type	Pr_V	Komponententyp des Knoten im Produktmodell (0 = Funktionsbauteil, 1 = Verbindungselement, 2 = Gehäuse, 3 = Kabelbaum, ..., n = beliebig festlegbar)	extern	statisch, Stammdaten
Hazmat	Pr_{Hz}	Kennzeichnung Gefahrgut, Boolesche Größe	extern	statisch
ProductionDate	T_{Prod}	Herstellungsdatum	extern	statisch
functionalIntegrity	Pr_{FI}	Operabilität, direkter Einsatz bei <i>Reuse</i> möglich, Boolesche Größe	extern	dynamisch, aus Lifecycle-Daten
PriceCore	C_{Core}	Kaufpreis des EoL-Produktes	extern	dynamisch, marktabhängig
CondDiag	Q_{DIAG}	Qualitätskennzahl aus Lebenszyklusdaten	extern	dynamisch, aus Lifecycle-Daten
CondOpt	Q_{OPT}	Qualitätskennzahl aus der optischen Bewertung	intern	dynamisch, bestimmt durch SPU
NodeID	Pr_{ID}	Individuelle Adresse der Komponente im Datenmodell	extern	statisch
PrecedencePosition	$Pr_{PrecPos}$	Alle für die Demontage abhängigen NodeIDs (Vorrangrelationen)	extern	statisch
TDisassembly	T_{Diss}	Demontagezeit	intern	dynamisch, Prozess- und Nebenzeiten (<i>eDIM</i> , Formel 2)
PDisassembly	C_{Diss}	Demontagekosten	intern	dynamisch, fixe und variable Kosten, siehe Formel 1
ExpCompResale	$I_{CompRes}$	Erwarteter Umsatz aus dem Komponenten-Teilverkauf	extern	dynamisch, strategische Analyse oder Vorhersagemodell
Demand	D_{Comp}	Nachfrage nach der Komponente (z. B. Bestellabrufe pro Zeiteinheit)	extern	dynamisch, aus historischen Daten
GradientPrice	∇_{Price}	Preisentwicklung der EoL-Komponente	extern	dynamisch, aus Modell (vgl. z. B. [196])
SocialAssessment	A_{Soc}	Sozialer Bewertungsfaktor der Demontage	extern	dynamisch, nach Bewertung
Environmental Assessment	A_{Env}	Ökologischer Bewertungsfaktor der Demontage	extern	dynamisch, nach Bewertung
WeightTheoretical	Pr_{WT}	Produktgewicht aus Stammdaten	extern	statisch
WeightActual	Pr_{WA}	Produktgewicht	intern	statisch für t_{Diss}
MassConstituent (multiple)	$M_{Constituent}$	Anteile der Materialien, die in der Komponente enthalten sind	extern	statisch
PriceMaterial (multiple)	$C_{Material}$	Preis der Materialien auf Tagesbasis	extern	dynamisch, Börsenpreise

Der in Tabelle 4.5 dargestellte Datensatz vereint die internen und externen Informationen zu den jeweiligen Komponenten im digitalen Produktmodell. Eigenschaftsbezogene Features werden als *Properties* (Pr_x) abgekürzt, zeitbezogene Features mit *Time* (T_x), kostenbezogene Features mit *Cost* (C_x) und ergebniswirksame Features als *Incentive* (I_x). Features, die Aufschluss über die Qualität der Komponente geben, werden mit *Quality* (Q_x) abgekürzt. Hierbei ist zwischen dem dynamischen Qualitätsindex aus Lebenszyklusdaten (z. B. *State-of-Health*, SoH, bei Traktionsbatterien) und dem Qualitätsindex aus der optischen Bewertung bei der Demontage zu unterscheiden. Für die recyclingbezogenen Verwertungswege sind vor allem die Massenanteile, *Mass* (M_x), der jeweiligen Materialien von großer Bedeutung. Für eine Weiterverwertung einzelner Komponenten unter Beibehaltung der Funktionalität sind die Nachfrage D_{Cmp} sowie die Preisentwicklung V_{Price} wichtige Faktoren, die aus Marktbeobachtungen oder strategischen Analysen gewonnen werden können. Für den Zielaspekt der Nachhaltigkeit ist zudem die Berücksichtigung ökologischer und sozialer Aspekte erforderlich. Die Bewertungsfaktoren *Assessment* (A_x) werden daher sowohl für die ökologischen Auswirkungen der Demontage als auch für die sozialen Konsequenzen berücksichtigt. Die Gewinnung dieser Faktoren hingegen ist komplex – so existieren mehrere Möglichkeiten der ökologischen Bewertung (z. B. Energieverbrauch, Chemikalienverbrauch und Abfallaufkommen bei [197] oder material- und prozessbezogene Evaluation der Lieferketten und deren Auswirkungen bei [198], sowie die Produktgestaltung und deren Auswirkung auf die Umwelt bei [199], uvm.) und der sozialen Bewertung von Verwertungsprozessen (z. B. deren volkswirtschaftlich-soziologischen Auswirkungen bei [200] und [201], sozial fokussierte LCA-Methoden bei [202] oder der Bewertung der Auswirkungen der Prozesse auf den Mitarbeiter nach ergonomischen Gesichtspunkten, vgl. [203]). Hier ist es in der praktischen Umsetzung erforderlich, dass im Rahmen des übergreifenden Informationsmanagements ein standardisiertes Verfahren der Bewertung festgelegt wird, um die Vergleichbarkeit und damit die Entscheidungsgrundlage sicherzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit geht es vorrangig um die Berücksichtigung dieser Bewertungsfaktoren im entwickelten Entscheidungsprozess vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitszielsetzung, ohne jedoch näher auf das für die Bestimmung benötigte, konkrete Verfahren einzugehen oder diese zu vergleichen.

Die Features können insgesamt je nach Abhängigkeit statisch oder dynamisch sein, d. h. sie sind produktindividuell und/oder veränderlich oder entsprechen gleichbleibenden Stammdaten. Eine Veränderung oder Erweiterung dieser Datenbasis ist möglich und kann für den individuellen Demontageprozess anwenderseitig vorgenommen werden. Eine Abstimmung mit anderen Stakeholdern der Closed-Loop Supply-Chain ist hierfür erforderlich, da die Aufnahme eines zusätzlichen Features im gesamten Lebenszyklus berücksichtigt werden muss.

In Vorbereitung auf die Verarbeitung in den weiteren Schritten des RCP-Prozesses kann der Datensatz im Rahmen eines *Preprocessings* so aufbereitet werden, dass die Daten eine für die automatisierte Weiterverarbeitung optimierte Struktur aufweisen. Eine wichtige Anforderung dabei ist, dass keine erforderlichen Informationen verloren gehen dürfen, d. h. es sind nur Preprocessing-Maßnahmen zulässig, welche den Informationsgehalt nicht verändern. Für den Entscheidungsprozess sind andere Features wichtig, als für die angeschlossene Sequenzplanung. Da der Berechnungsaufwand konzeptbedingt bei der Entscheidung höher ist, wird ein umfangreiches Preprocessing nur hier durchgeführt. Für die Sequenzplanung genügen die strukturbezogenen Informationen aus den Datensätzen (Vorrangrelationen) sowie die Ergebnisse des Entscheidungsprozesses.

In einem ersten Schritt werden alle Features, die für die Demontageentscheidung nicht notwendig sind, aus dem zu verwendenden Datensatz entfernt. Dies betrifft die Daten mit nicht-objektbezogenen

Strukturinformationen wie der *NodeID*, da diese keine Informationen zum physischen Bauteil und dessen Verwertungspotenzial beinhaltet. Ein Folgeschritt kann daraufhin die Zusammenfassung von Features sein, die nur in Kombination eine relevante Information zu Verwertungsentscheidungen beitragen. Für die EoL-Verwertungsoption eines stofflichen Recyclings ist vor allem der aus den Materialanteilen erzielte Erlös ein wichtiger *Incentive* (I_{MatRec} , Gleichung 3). Diese Zusammenfassung kann in Abhängigkeit der Menge an Materialien in der Zielbaugruppe eine wesentliche Dimensionsreduktion im Eingangsdatensatz erzielen.

$$I_{MatRec} = \sum_{i=0}^{N_{Constituent}} Pr_{WA} * M_{Constituent_i} * C_{Material_i} \quad (3)$$

Um den Umstand erhöhten Materialreinheitsgrads bei steigendem Demontagegrad (durch die mechanische Entfernung von unwichtigen Komponenten, z. B. aus Kunststoff im Gehäusebereich, kann in nachfolgenden Verfahren eine bessere Recylingausbeute erzielt werden) zu berücksichtigen, kann der Demontagegrad L_{Diss} in die Bestimmung des Materialerlöses durch einen Dämpfungsfaktor integriert werden (Gleichung 6). In Annäherung an eine realistische Verteilung liefert Gleichung 4 Erlöse zwischen 36,7 % und 100 % des maximal erzielbaren Erlöses. Eine exakte Bestimmung dieser Verteilung ist wiederum von den verwendeten Materialien und dem technologisch maximal erreichbaren Demontagegrad $L_{Diss_{max}}$ abhängig und muss daher bei Bedarf individuell ermittelt werden.

$$I_{MatRec}(L_{Diss}) = I_{MatRec} * \frac{e^{\frac{L_{Diss}}{L_{Diss_{max}}}}}{e} \quad (4)$$

Sind die Daten auf diese Weise für den Entscheidungsprozess vorbereitet worden, kann in einem weiteren Schritt des Preprocessings eine Skalierung der Daten durchgeführt werden, um den Einbezug stark heterogener Verteilungen für die Verwendung statistischer Verfahren zu homogenisieren. Es gibt zahlreiche Skalierungsverfahren im Machine Learning, die je nach Beschaffenheit des Datensatzes und des ausgewählten Verarbeitungsalgorithmus eingesetzt werden können [204]. Besonders wirksam und daher vorbereitet ist das Verfahren der *Normalisierung* (Engl. oft *Min-Max-Scaler* oder *Unity-based Normalization*), Gleichung 5, bei dem die Werte in Abhängigkeit ihrer Minima und Maxima auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 skaliert werden. Gerade im Bereich der neuronalen Netze kann die Normalisierung auch für jedes Trainingsbatch als Teil des Modells ausgeführt werden, um das Lernverhalten deutlich zu verbessern [205].

$$Feature_{Normalisiert} = \frac{Feature - Feature_{min}}{Feature_{max} - Feature_{min}} \quad (5)$$

Eine *Principal Component Analysis* (PCA) kann den Datensatz weiter verdichten, wobei Features mit einem geringeren Informationsgehalt zugunsten der Dimensionsreduktion aufgegeben werden. Diese Methode transformiert die Daten in orthogonale Komponenten, die jeweils die maximale Varianz im Datensatz durch den Informationsgehalt repräsentieren (also die Eigenvektoren der Kovarianzmatrix) [206]. Nach dem *Pareto-Prinzip* können so weniger einflussreiche Features gestrichen werden. Diese Methode soll im Rahmen des RCP nicht angewendet werden, da die Datensätze dynamisch sind und sich damit auch die Bedeutung der einzelnen Faktoren im Betrieb ändern kann – in einem solchen Fall kann eine PCA also Features ausschließen, die in zukünftigen Prozessen von Bedeutung wären.

Entscheidung über den Demontagegrad

Der Entscheidungsprozess bestimmt auf Basis des verdichteten Datensatzes komponentenweise ob demontiert werden soll oder nicht und damit über die weiteren Verwertungsmöglichkeiten. Bei diesem Entscheidungsproblem handelt es sich um einen Schlüsselfaktor in der *Operationalität* von Zielen kreislaufwirtschaftlicher Systeme. Operationalität von Zielen liegt vor, wenn *ex ante* (*ex post*) überprüft werden kann, bis zu welchem Grad sie erreicht werden (erreicht wurden) [156]. Sie sind somit messbar und nachvollziehbar. Der Demontagegrad eines Produktes als Ergebnis des Entscheidungsprozesses hat maßgebliche Auswirkungen auf das gesamte ökonomische Modell der jeweiligen Verwertungskette. In Abbildung 4.9 ist ein solches Modell für das stoffliche Recycling dargestellt. Gegenüber den asymptotisch steigenden Erlösen des Recyclings wachsen die Demontagekosten exponentiell an. Es gibt also einen Punkt, an dem ein Optimum im wirtschaftlichen Entscheidungsprozess bestimmt werden kann. Im Rahmen von Nachhaltigkeitsbetrachtungen sind allerdings auch ökologische und soziale Faktoren von Bedeutung und müssen gegen die rein wirtschaftlichen Interessen abgewogen werden – hier zeigt sich schnell, dass eine reine Grenzkostenoptimierung das realwirtschaftliche Spannungsfeld nicht ausreichend reflektiert.

Beim RCP handelt es sich um eine Entscheidung auf Unternehmens- bzw. Maschinenebene, die jedoch stark von externen Entwicklungen abhängig ist. Da es praktisch nicht möglich ist, alle Einflussgrößen eines kreislaufwirtschaftlichen Systems zu bestimmen und in einer Referenzeinheit zu quantifizieren, ist es erforderlich, eine geeignete Heuristik zur Entscheidungsfindung zu definieren. Da als Grundlage die Datensätze aus dem digitalen Produktmodell zur Verfügung stehen, soll der Entscheidungsprozess diese Informationsmenge berücksichtigen. *Alamerew et al.* [207] führen im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft den Begriff des *Multi-Criteria-Decision-Making* (MCDM) ein, um auf Produktebene die Nachhaltigkeitsauswirkungen von Entscheidungen in der Kreislaufwirtschaft untersuchen zu können. Diesem Ansatz folgend sollten ökologische, ökonomische, soziale, gesetzliche, technische und marktrelevante Aspekte in einem Entscheidungsmodell berücksichtigt sein. Informationen zu allen genannten Kategorien finden sich im oben beschriebenen Datenmodell. Sofern das Entscheidungsmodul diese Daten vollständig verarbeiten kann, ist gemäß [207] der Nachhaltigkeitsanspruch erfüllt.

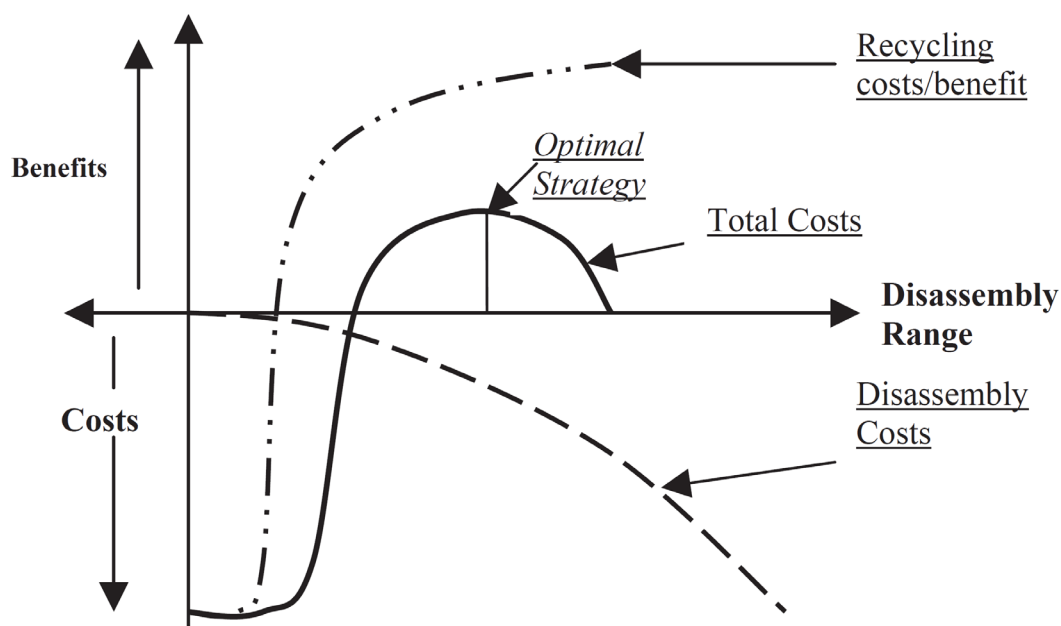


Abbildung 4.9: Ökonomisches Modell einer optimalen Demontagestrategie für das Recycling [47]

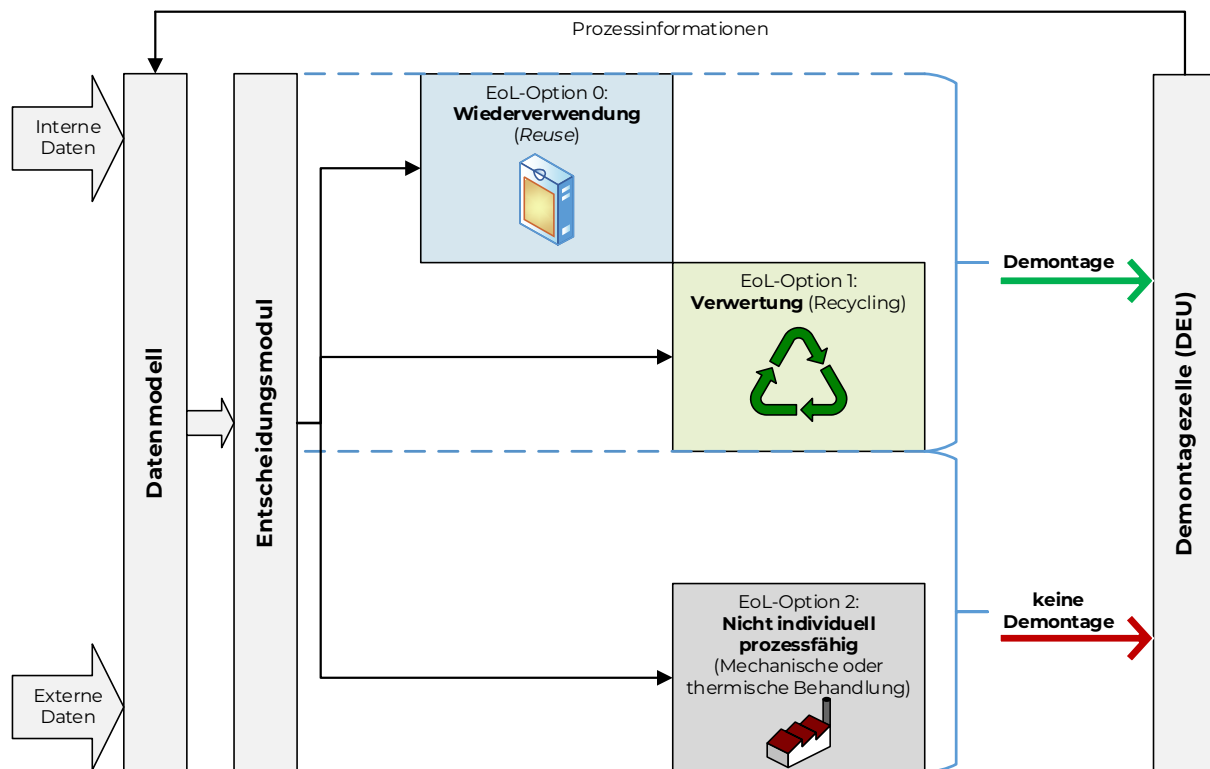


Abbildung 4.10: Entscheidungsoptionen des RCP im Demontageprozess

Da es in der Verwertungshierarchie (vgl. Abbildung 2.1) definitionsabhängig bis zu neun Optionen gibt, müssen die Entscheidungsklassen für den RCP differenziert festgelegt werden. Die erste Gruppe der intelligenten Verwendung und Herstellung (R0 bis R2) schließt die Demontage grundsätzlich aus. In der zweiten Gruppe, der Erweiterung der Lebensdauer von Produkten und Komponenten (R3 bis R7), liegt der Fokus auf dem Funktionserhalt, der Aufarbeitung oder der Umwidmung der Komponenten. Aus Sicht der Demontage bedeuten diese Fälle, dass einzelne Bauteile möglichst werterhaltend demontiert werden sollen, um gemäß ihrer funktionellen Integrität wiedereingesetzt oder aufgearbeitet zu werden. Für das System wird in diesem Fall die Klasse *EoL-Option „0“* festgelegt. Die dritte Gruppe beinhaltet die Optionen der materiellen Verwertung (R8 und R9). Das *Recycling* (R8) fokussiert sich auf die qualitätsorientierte Materialrückgewinnung und die *Recovery* (R9) beschreibt die thermische Verwertung. Demontage lohnt sich als kostenintensiver Arbeitsschritt nur, wenn eine Wieder- bzw. Weiterverwertung des Produktes oder der Komponenten angestrebt wird oder für spezifische Recyclingprozesse für einzelne Komponenten mit wertvollen Inhaltsstoffen. Bauteile, die nicht für die Demontage geeignet sind, werden daher zur mechanischen oder thermischen Weiterverarbeitung im Hinblick auf die Verwertung verbracht. Es ergeben sich die Klassen *EoL-Option „1“* und *EoL-Option „2“*. Eine Erweiterung der Entscheidungsklassen auf alle Optionen der Kreislaufwirtschaft ist grundsätzlich möglich. In Abbildung 4.10 ist dieser Ablauf schematisch dargestellt.

Auf Grundlage dieser Entscheidungsklassen kann die Aufgabe als einfaches Multi-Klassen-Klassifizierungsproblem (Engl. *single-label multi-class classification problem*) modelliert werden. Eine einfache Binärklassifikation in *Demontage* und *keine Demontage* wäre zwar für die Arbeit des Robotersystems ebenfalls zielführend, folgt aber nicht dem Anspruch eines integrierten Informationsmanagements, da die Informationen über das Ergebnis in Form der Verwertungsoption wieder selbst wertvoll für andere Stakeholder im Kreislaufwirtschaftssystem sein können und daher an das System zurückgespielt werden sollen. Da dieser Entscheidungsschritt ebenenweise durch das Robotersystem durchgeführt werden soll,

ist es eine Voraussetzung, dass die Initialentscheidung für das gesamte Produkt eine Demontage rechtfertigt. Hierfür können beispielsweise übergeordnete, strategische Frameworks (vgl. *Modellbasierte Entscheidungsplattform* in [208]) genutzt werden. In Erweiterung der bestehenden, teilweise in Kapitel 2.4 vorgestellten Entscheidungsmethodiken für die Demontageplanung (vgl. [116, 158, 161, 172, 209, 210]) soll das hier entwickelte Konzept demnach unter Berücksichtigung multipler Kriterien und einer Nachhaltigkeitszielsetzung den Demontagegrad des Produktes durch gezielte, komponentenweise Entscheidungen bestimmen und auf diese Weise ebenfalls zu einer informationsbezogenen Wertschöpfung in der Kreislaufwirtschaft beitragen. Es ist außerdem nicht direkt mit der Sequenzplanung verknüpft, was die Einsatzmöglichkeit in angrenzenden Bereichen bzw. eine Übertragung des Konzeptes in praktisch existente Demontageumgebungen deutlich erleichtern kann. Im Unterschied zu rein quantitativ entscheidenden Modellen (vgl. [211]) sollen die *Regeln* nicht deterministisch festgelegt, sondern anhand praktischer Datenbeispiele erlernt werden. Die Entscheidung findet dabei lokal statt, im Unterschied zu strategischen Wirtschaftsmodellen, die verschiedene Stakeholder simultan verknüpfen (vgl. [212]).

Deterministische Modelle und Algorithmen funktionieren für komplexe Systeme wie die Kreislaufwirtschaft nur mit Annahmen und bringen dann exakte Ergebnisse auf Basis der angenommenen Voraussetzungen. Für ein robotergestütztes Demontagesystem ist allerdings die pragmatische Lösung im Kontext einer industriellen Implementierung entscheidend, wobei heuristische Methoden zwar größere Schwankungen aber besser anwendbare Ergebnisse liefern. Aufgrund dessen soll statt eines auf festen Regeln basierenden *Expertensystems* für das Entscheidungsmodul eine statistische ML-Methodik verwendet werden. Hierbei handelt es sich um ein Vorhersagemodell für die jeweilige Klasse auf Basis eines vorliegenden Datensatzes, das entsprechend trainiert werden muss und sich auch in der Betriebsphase durch einen kontinuierlichen Lernprozess anpassen lässt. *Gao et al.* [213] fassen ebenfalls zusammen, dass bisherige Ansätze ausschließlich regelbasiert-deterministisch als Optimierungsproblem arbeiten. Dieser verbreiteten Vorgehensweise soll hier nun ein ML-basierter Ansatz gegenübergestellt werden.

Bei der Auswahl einer geeigneten ML-Methode kann aufgrund des *NFL-Theorems* [126] vorab keine fundierte Aussage bezüglich der optimalen Strategie getroffen werden, da jede Methode eigene Vor- und Nachteile mit sich bringt. Die empirische Überprüfung der Methoden in einem methodischen Vergleich ist daher in der Praxis unabdingbar [214]. Als Grundvoraussetzung müssen die zu überprüfenden Methoden in der Lage sein, den Eingangsdatensatz aus der vorverarbeiteten Datentabelle zu verwenden. Hierfür sind es in einem verdichteten Datensatz nach Tabelle 4.5 mindestens 17 unabhängige Dimensionen, die verarbeitet werden müssen. Ein Unterschied in den Daten im Vergleich zu anderen regelbasierten Kennfeldmethoden ist die nicht zwangsläufige Linearität des Inputs in Bezug auf das Entscheidungsergebnis, da sich sowohl die Entwicklung der Features als auch deren Auswirkung auf das Ergebnis stark unterscheiden kann (eine Korrelationsanalyse für einen Beispieldatensatz findet sich in Kapitel 5). Es soll daher bei der Auswahl der Kernel für originär lineare Methoden auch auf die Verwendung non-linearer Kernel geachtet werden (dies betrifft z. B. die SVM und die Regression) [124]. Zur Auswahl des Verfahrens werden daher folgende ML-Methoden für den Entscheidungsprozessor in einem systematischen Benchmark untersucht [215]:

- Logistische Regression
- K-Nearest-Neighbour
- Naiver Bayes-Klassifikator
- Support Vector Machine
- Entscheidungsbaum-Modelle (Standard, Ensemble und Boosted)
- Neuronales Netz

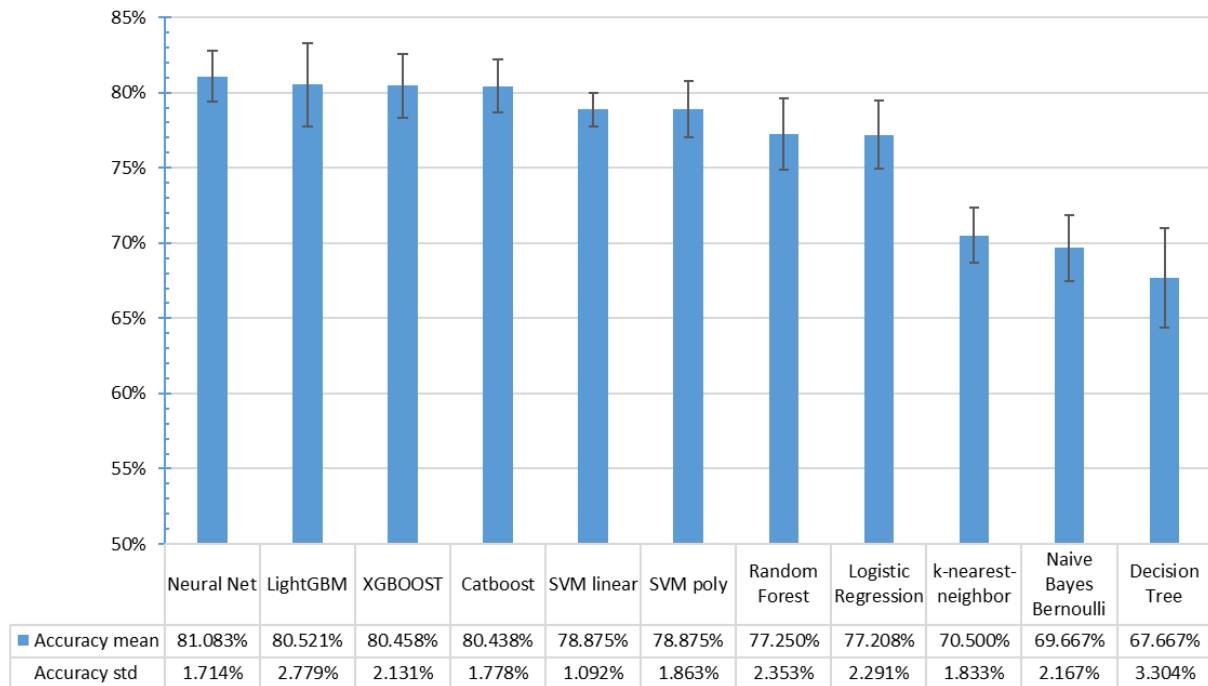


Abbildung 4.11: Ausgewählte Ergebnisse des Benchmarks von Entscheidungsmethoden

Im Rahmen des durchgeführten Benchmarks wurden die unterschiedlichen Klassifizierungsmethoden anhand eines 1200 Samples umfassenden Referenzdatensatzes von Traktionsbatterien aus der prototypischen Konzeptumsetzung (siehe Kapitel 4.5) untersucht. Die Genauigkeiten sind das Ergebnis einer 4-fach stratifizierten Kreuzvalidierung, um statistische Schwankungen zu berücksichtigen und die jeweiligen Unterschiede in der Repräsentation einzelner Label auszugleichen (vgl. [216]). Die Hyperparameter der getesteten Verfahren wurden dabei jeweils mit einem genetischen Algorithmus nach *Harvey* [217] optimiert, wobei sich die Parameter für Generationen und Populationen an der Beispielanwendung auf die CIFAR10-Datenbank¹⁰ orientieren (10 Generationen, 20 Populationen). Eine weitere Verbesserung bei einer Erhöhung der Generationen oder Variierung der Kreuzungs- und Mutationsparameter ist nicht ausgeschlossen, für die Vergleichbarkeit der Verfahren im Benchmark jedoch nicht erforderlich, da vor allem die methodische Stringenz und Reproduzierbarkeit wichtig ist.

Die Ergebnisse der mittleren Genauigkeit sowie die Standardabweichung sind in Abbildung 4.11 für die besten geprüften Verfahren abgebildet. Es zeigt sich, dass vor allem das NN als auch geboostete Entscheidungsbäume die besten Klassifizierungsergebnisse erzeugen. Probabilistische Methoden (*Bayes*), Ähnlichkeitsmetriken (*k-nearest-neighbour*) sowie ungeboostete Entscheidungsbäume sind für den Referenzdatensatz weniger geeignet, unabhängig von den verwendeten Kernen und Parametern. Die logistische Regression sowie Ensemble-Modelle von Entscheidungsbäumen (*Random-Forest*) liegen mit einer mittleren Genauigkeit von ca. 77% unter den SVM mit linearen oder polynomiellen Kernen. Sigmoidale oder radiale Kernel liefern bei der SVM schlechtere Ergebnisse im Bereich von 72% bis maximal 77%.

Um den Aufbau der Entscheidungslogik zu überprüfen (direkte Multi-Klassen Entscheidung oder gestaffelte Binärentscheidung) wurden auch diese Vorgehensweisen anhand des Benchmark-Referenzdatensatzes für die in Frage kommenden Verfahren verglichen. Es zeigte sich bis auf wenige Ausnahmen eine bessere Performance der einstufigen Verfahren von etwa 1-7% in der Klassifizierungsgenauigkeit.

¹⁰ Canadian Institute For Advanced Research; Bilddatenbank der University of Toronto: <https://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html> [02.12.2020]

Dies liegt vor allem an der simultanen Berücksichtigung der Label *0-Reuse* und *1-Recycle*, die bei zwei-stufig-binären Verfahren schlechter differenziert werden konnten.

Der methodische Vergleich im Rahmen dieser Arbeit zeigt, dass sowohl NN als auch geboostete DT-Modelle für die hier aufkommenden tabellarischen Daten die besten Ergebnisse liefern. Neuronale Netze haben in vielen Anwendungsfällen bessere Generalisierungseigenschaften und skalieren am besten mit einer Steigerung der Menge an Trainingsdaten. *Feng et al.* [218] und *Popov et al.* [219] gehen dennoch von einer Dominanz der geboosteten DT-Verfahren im Bereich der tabellarischen Datensätze aus, zeigen jedoch keinen repräsentativen Vergleich mit NN. Beide Quellen schlagen allerdings eine Kombination der Vorteile beider Methoden durch die Verwendung mehrschichtiger, verketteter DTs vor (was einem DL-Ansatz für DT-Algorithmen entspricht). Eine Überprüfung dieser neuartigen Ansätze für den Referenzdatensatz des Benchmarks an der NODE¹¹-Architektur [219] zeigt, dass der Testdatensatz mit generischen Batteriedaten zu klein ist, um verwertbare Trainingsergebnisse für eine erfolgreiche Generalisierung zu erzielen (es konnten lediglich mittlere Genauigkeiten im Bereich von ca. 65% erzielt werden). Für das Training sind Mini-Batches statt einem reinen SGD-Batch erforderlich, was bei der geringen Trainingsdatenmenge schwierig ist, da so eine überproportionale Gewichtung ungleichmäßig verteilter Klassen innerhalb der Baummodelle erfolgt, was Overfitting zur Folge hat. Weiterhin sind diese sehr tiefen Modelle auch mit aktueller Hardware kaum in verteilten Systemen trainierbar, da alleine bei der NODE-Architektur mehrere verkettete Netze mit je 1024 verdeckten Layern, die wiederum jeweils Entscheidungsbaum-Ensembles enthalten, die mehr Dimensionen als der Datensatz Features aufweisen, berechnet werden müssen (das Training des Referenzdatensatzes erzeugt hier bereits über 20 GB Zwischenablage an erforderlichem Grafikspeicher). Da der Benchmark für die Lebenszyklus-Daten überdies ergeben hat, dass eher flache neuronale Architekturen die beste Performance bieten, wird der Ansatz tiefer geboosteter Methoden nicht weiterverfolgt. NN-Architekturen sind darüber hinaus im Training deutlich effizienter: Der finale NN-Algorithmus bedarf bei ca. 5 Minuten Berechnungszeit einer mittleren Leistungsaufnahme von 125 W, wohingegen die NODE-Architektur ca. 45 Minuten bei einer mittleren Leistungsaufnahme von 420 W in den Grafikprozessoren rechnet.

Für die Klassifizierung der EoL-Verwertungsoption einer Komponente auf Grundlage eines umfassenden Lebenszyklus-Datensatzes wird daher ein voll-verbundenes NN verwendet (siehe Tabelle 4.6). Die Architektur ist robust gegenüber der Veränderung des Informationsmodells durch Hinzunahme oder Löschung von ca. 4 Features. Bei einer größeren Veränderung der Datenbasis sollten die Netzarchitektur und die Hyperparameter neu abgestimmt werden. Der Aufbau des NN basiert auf dem in [194] veröffentlichten Netz mit einer Architektur und Hyperparameteroptimierung auf Grundlage der Ergebnisse von [215].

Tabelle 4.6: Aufbau des NN des RCP-Entscheidungsmoduls

Element	Umsetzung	Erläuterung
Architektur	Input Layer: <ul style="list-style-type: none"> • Typ: Dense, 2048 Neuronen, Aktivierung: ReLU Hidden Layer: <ul style="list-style-type: none"> • Nach Input folgt Dropout 0.2 • Aktiviert: 1 Dense Layer, 30 Neuronen, ReLU 	Aufgrund der Optimierung der Netzarchitektur mit Hilfe eines genetischen Algorithmus wird nur ein Hidden-Layer für die Netzarchitektur verwendet. Das Input-Layer ist mit 2048 Neuronen relativ groß, um eine möglichst hohe Informationsqualität aus dem Datensatz einzulesen. Dies ist erforderlich.

¹¹ NODE = Neural Oblivious Decision Ensembles

	<p>Output Layer:</p> <ul style="list-style-type: none"> Dense Layer, 3 Neuronen, Aktivierung: Softmax 	<p>derlich, da eine Korrelationsanalyse (siehe Kapitel 5) nur sehr geringe Trennschärfe zwischen den Features zeigt.</p> <p>Als Aktivierung des Input-Layers und des Hidden Layers wird eine nichtlineare Gleichrichterfunktion (Engl. <i>rectified linear unit</i>, <i>ReLU</i>) verwendet [220]. Sie entspricht dem Positivteil des Arguments des Neurons.</p> <p>Das Hidden-Layer enthält lediglich 30 Neuronen, da sich dieser Wert im Rahmen der Hyperparameter-Optimierung in einem Kennfeld von 8 bis 600 Neuronen (variierende Schrittweite) als am besten herausgestellt hat.</p> <p>Die Dropout-Schicht regularisiert die Gewichtungen, in dem zufällige 20% der Neuronen für den Folgeschritt nicht berücksichtigt werden. Dies beugt der Überanpassung (<i>Overfitting</i>) im Lernprozess vor.</p> <p>Das Output-Layer gibt drei Neuronen als Repräsentation der EoL-Verwertungsklassen aus. Die Aktivierung mit der Softmax-Funktion transformiert den Tensor der Output-Neuronen durch Normalisierung mittels Exponentialfunktion in einen Wertebereich von 0 bis 1, der der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Klassen entspricht.</p>
Optimierungsfunktion	<p>Stochastischer Gradientenabstieg (SGD) mit Moment und Dämpfung:</p> <ul style="list-style-type: none"> Lernrate: 0.0003 Dynamische Lernratenabnahme (Decay): 0.0001 Nesterov-Moment: 0.4 	<p>Beim SGD wird die Zielfunktion durch eine schrittweise (für jeweils ein Sample), differenzierbare Annäherung beschrieben. Im NN bewirkt die Optimierungsfunktion der Gewichtungen der Neuronen auf Basis des Gradienten der Zielfunktion das eigentliche „Lernen“. Der Gradient wird dabei mittels <i>Backpropagation</i> aus der Zielvorgabe des Trainingsbeispiels im überwachten Lernprozess bestimmt (siehe [124]).</p> <p>Mit dem <i>Nesterov</i>-Moment (vgl. [221]) wird nicht entgegen des Gradienten gearbeitet, sondern dessen aktuelle Richtung berücksichtigt. Die Bestimmung des Gradienten erfolgt im Vergleich zu klassischen Momentenverfahren um eine Positionsverschiebung in Richtung des Moments. Damit ist das Gewichtungselement w:</p> $w = w + momentum * velocity - learning_rate * grad$
Verlustfunktion	Kategoriale Kreuzentropie	<p>Bestimmt die Verlustfunktion auf Basis der Informationsentropie nach <i>Shannon</i> [222]. Bei der kategorialen Kreuzentropie lernt das Netz den Abstand (<i>Entropie H</i> in Bit) zwischen dem Aus-</p>

		gabevektor und dem Eingangstensor zu minimieren. Die Kreuzentropie ist dabei die Summe aus der Ausgangsentropie und der <i>Kullback-Leibler-Divergenz</i> (siehe [223], der eigentliche Abstand) der Wahrscheinlichkeitsmodelle.
Trainingsparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Batch-Größe: 8 • Maximale Epochen: 2000 • Kreuzvalidierung: k=4 • Vorzeitiger Stopp bei sich nicht veränderndem Gradienten der Validierungsgenauigkeit 	Die Veränderung der Batchgröße hat Auswirkungen auf das Training des Netzes. Der <i>Batch</i> beschreibt die Menge der Trainingsbeispiele, die pro Durchgang parallel verarbeitet werden. Die minimale Batchgröße 1 liefert das größte Feedback (die häufigsten Aktualisierungen der Gewichtung), allerdings auch die größte Streuung. Ein zu großer Batch benötigt sehr viel Speicher und führt im Falle der gesamten Trainingsmenge auch nur zu einem Update pro Epoche, sodass mehr Epochen insgesamt notwendig sind. Die Kreuzvalidierung dient der Absicherung des statistischen Verfahrens durch Bestimmungsmöglichkeit der Standardabweichung.

Eine Anpassung der Hyperparameter ist für Produktgruppen mit einer abweichenden Anzahl an Features erforderlich. Die detaillierte Auswertung der erreichbaren Genauigkeiten erfolgt als Teil der Evaluation der Forschungshypothesen in Kapitel 5. Der Aufbau des Testdatensatzes für Traktionsbatterien und die Implementierung im Prototypen wird in Abschnitt 4.5 näher erläutert.

Auf Grundlage der EoL-Verwertungsentscheidung für jede Komponente aus dem Informationsmodell kann der Demontagegrad des Gesamtproduktes berechnet werden. Im Unterscheid zum Demontagegrad bei *Tian et al.* [224] soll nicht das Verhältnis der Anzahl der zu demontierenden Bauteile im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Bauteile verwendet werden, sondern die Anzahl der entscheidungsbasierten Operationen zur Menge der möglichen Demontageoperationen (siehe Gleichung 6). Diese Berechnungsmethode hat den Vorteil, dass der Demontagegrad eine Prozessinformation und keine Produktinformation darstellt, die für die Planungsprozesse eines Demontagebetriebes einen größeren Nutzen hat, als ein strukturunabhängiger Bauteil-Quotient. Für einen produktbezogenen Demontagegrad müsste weiterhin berücksichtigt werden, dass ein zu demontierendes Bauteil einen unterschiedlichen Effekt auf die kreislaufwirtschaftlichen Prozesse in Abhängigkeit von der Hierarchieebene der Komponente im Gesamtprodukt sowie dem individuellen Wertanteil hat (die Demontage einer Batteriezelle hat beispielsweise eine andere Auswirkung als die Demontage eines vollständigen Moduls). Diese Zusammenhänge sind wiederum für jede Produktgruppe individuell, sodass ein produktinformationsbezogener Demontagegrad deutlich weniger vergleichbar ist als ein prozess- und operationsbezogener Demontagegrad.

$$L_{Diss}(i) = \frac{j(x_j)}{j(\mathbf{D}_{ij})} \quad (6)$$

Abschließend ist es wichtig festzuhalten, dass eine Entscheidung des RCP gegen die Prozessfähigkeit für eine automatisierte Demontage nicht bedeutet, dass die Komponenten nicht trotzdem recycelt werden können – es heißt nur, dass es nicht sinnvoll ist, das Bauteil weiter zu demontieren.

Lernprozess zur Ergebnisverbesserung

Der Hauptvorteil der KI-basierten Entscheidungsfindung liegt in der Möglichkeit, die Ergebnisgenauigkeit mit im Betrieb erlangtem Erfahrungswissen zu verbessern. *Beierle* [141] spricht hier vom Unterschied zwischen dem Lernelement und dem Performanzelement einer KI: Das *Performanzelement* interagiert auf Basis des vorhandenen Wissens (in diesem Fall der Entscheidungsprozess), das *Lernelement* hingegen nimmt Impulse aus der Umgebung auf und modifiziert damit das bestehende Wissen oder erzeugt neue Wissensaspekte. Beim RCP werden im Entscheidungsprozess als Performanzelement die Verwertungsoptionen der zu demontierenden Bauteile festgelegt. Da diese Entscheidung aufgrund eines Trainings mit produkt- und prozessbezogenen Informationen zu einem festen Zeitpunkt erfolgt ist, ist das Lernverhalten so grundsätzlich als statisch zu betrachten. In der Praxis verändern sich jedoch bestimmte produkt- und prozessbezogene Sachverhalte, wie beispielsweise Produktzyklen der Hersteller, was einen großen Einfluss auf die endgültige Verwertungsoption haben kann. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Datenbasis für den Entscheidungsprozess mit einem dynamischen Lernelement kontinuierlich zu verbessern. Dies kann auf zwei Arten erfolgen: Zum einen kann durch eine Vergrößerung der Trainingsdaten aus realen Demontageprozessen eines aktuellen Zeitraums die Grundlage der Gewichtungen der einzelnen Features aus dem Datenmodell verbessert werden, zum anderen ist es möglich, in Form eines *Kritikelements* eine Rückmeldung zu den getroffenen Entscheidungen zu integrieren.

Die Umsetzung des Lernprozesses zur Ergebnisverbesserung soll beide Elemente enthalten. Hierfür wird wie in Abbildung 4.12 visualisiert zyklisch die Trainingsmenge für den Entscheidungsprozessor mit Daten anderer Stakeholder über die dezentrale Informationsbasis aktualisiert, um übergreifende Entwicklungen in der Kreislaufwirtschaft in die Anlagenebene zu integrieren. Neben diesem Lernen durch (weitere) Beispiele ist die Rückmeldung als Kritikelement dem Lernen durch Anweisungen zuzuordnen. Hier gibt es für den RCP wieder zwei grundlegende Optionen: In der ersten kann der Bediener durch Eingabe im HMI eine manuelle Entscheidung zur potenziellen Verwertungsoption vornehmen, die als *true-positive* Referenz dem Trainingsdatenumfang hinzugefügt werden kann. Auf diese Weise kann auch die Entscheidungscharakteristik den Präferenzen des jeweiligen Betriebs angepasst werden (als Art einer kundenindividuellen Anpassung). Die zweite Option bezieht sich auf eine direkte Korrektur im Prozess, wenn sich zeigt, dass für bestimmte Komponenten die projizierte Verwertungsoption nicht erreichbar ist. Diese „Fehlentscheidungen“ können an das Entscheidungsmodul zurückgespielt werden, um auch produktindividuelle oder verfahrenstechnische Besonderheiten zu berücksichtigen. Aus technischen Gründen erfolgt das nachtrainieren in einem Batch-Verfahren zu festgelegten Zeitpunkten. Ein paralleles Weiterlaufen des alten Trainingsstandes im Produktivmodul ist ohne Einschränkungen währenddessen möglich, ein Austausch der Modelle ist automatisiert in wenigen Sekunden durchführbar.

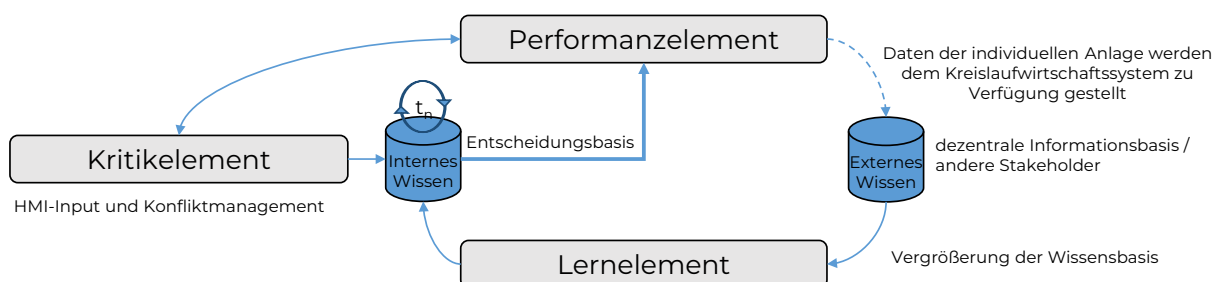


Abbildung 4.12: Schematischer Lernprozess des RCP

Optimierte Sequenzplanung

Nachdem für die Entscheidung über die EoL-Option das im Informationsmodell enthaltene Wissen über das Produkt verarbeitet wurde, kann mit dieser Information ein rein prozessbasierter Planungsansatz für die Demontagesequenz verwendet werden. *Roy et al.* [225] haben unterschiedliche Ansätze untersucht und betrachtet, wobei von neun verschiedenen Methoden nur der Ansatz von *Lambert* [33] dieses Kriterium erfüllt. Eine Planung auf Grundlage der Vorrangrelationen über einen AND/OR-Demontagegraphen bietet den Vorteil, dass die Menge der möglichen Sequenzen durch die Produktstruktur ermittelt werden kann, um dann in einem zweiten Schritt eine Gewichtung dieser Pfade anhand der Ergebnisse aus dem Entscheidungsprozess mittels linearer Berechnung vorzunehmen. Dies ist möglich, da die Entscheidungsergebnisse unabhängig von der Zielsequenz sind [226]. Die Methode von Lambert ist im Vergleich zu KI-Ansätzen, z. B. über Fuzzy-Logik [171] oder künstliche Ameisenkolonien [227] pragmatischer, da hier das gewonnene Prozesswissen besser gespeichert und weitergegeben werden kann.

Da jedoch bauteilindividuelle Produktinformationen in diesem Ansatz zur Sequenzplanung fehlen, werden Unsicherheiten in dieser Vorgehensweise nicht berücksichtigt. Holistische Ansätze, wie von *Feng et al.* [161] nutzen die Grundlagen dieses Ansatzes zwar ebenfalls auch in aktuellen Sequenzplanungsmethoden, inkludieren aber die gesamte Entscheidungsplanung in die Sequenzoptimierung, was eine Metaheuristik wie z. B. genetische Algorithmen für die Optimierung erforderlich macht, da die Berechnung des idealen Pfades ansonsten nicht effizient darstellbar ist. Durch die Vorgehensweise beim hier konzipierten RCP die Entscheidungsplanung auf Basis des Produkt-Informationsmodells vom Schritt der Sequenzplanung zu entkoppeln, ist es möglich, für die Sequenzplanung einen linearen Ansatz zu wählen. Da die Entscheidung der Verwertungsoption vorweggenommen wurde, ist kein entscheidungsbasierter Optimierungsalgorithmus notwendig, was den Berechnungsaufwand der Sequenzplanung erheblich reduziert (von einem *NP-vollständigen*¹² Entscheidungsproblem zu einer einfacheren Priorisierung der nach Vorrangrelationen möglichen und EoL-Optionen sinnvollen Demontagesequenzen). Dem klassischen Vorgehen von Lambert folgend ist die Sequenzplanung damit deterministisch möglich, da der Planungsteil durch den nicht-deterministischen Entscheidungsprozessor fähig wird, mit den Unsicherheiten des Demontageprozesses umzugehen. Dieser modulare Aufbau des RCP ermöglicht reproduzierbare und übertragbare Demontageanleitungen, die gleichzeitig flexibel für individuelle Bauteilsituationen geplant werden können. Wichtig ist darüber hinaus, dass das Konzept für die selektive Demontage auch teilständige Sequenzen bestimmen kann, bei denen sich nicht lohnende Baugruppen auch nicht demontiert werden bzw. einzelne Module des Produktes für den Fall der Wiederverwendung ebenfalls vollständig belassen werden.

¹² Es handelt sich dabei um eine Komplexitätsklasse aus der theoretischen Informatik [228]: Die nichtdeterministische Komplexität NP einer Turingmaschine M auf eine Eingabe x sei definiert als die Komplexität der effizientesten Berechnung von M auf x mit dem richtigen Resultat. Da es keine effizientere Möglichkeit der deterministischen Simulation einer nichtdeterministischen Berechnung gibt, als diese systematisch mit allen Teilberechnungen zu simulieren, führt dieses Vorgehen zu exponentiellem Wachstum der dafür erforderlichen Zeit. Praktisch kann sich die Berechnung so vorgestellt werden, dass erst eine Annahme getroffen werden muss, und diese dann verifiziert wird. Für die Demontage ist das auf die Sequenzplanung übertragbar, da Schritt 2 einer Sequenz nur sinnvoll ausgewertet werden kann, wenn angenommen wird, dass Schritt 1 ebenfalls ausgeführt wurde. Dieses Problem wird für ein komplexes Produkt mit einem großen Maß an parallelen Möglichkeiten schnell so mächtig, dass keine vollständige Berechnung mehr möglich ist. Die Berechnung in polynomieller Zeit kann also als Kriterium der praktischen Lösbarkeit betrachtet werden. NP-vollständig bedeutet mathematisch formuliert, dass für alle Probleme $P' \in NP$ gilt $P' \leq_p P$ (sind auf P reduzierbar, auch *NP-schwer* genannt) und gleichzeitig $P \in NP$. Im hier entwickelten Konzept wird im RCP der Schritt der Annahme bereits im Entscheidungsmodul ausgeführt und durch die KI verifiziert, sodass die Berechnung der Sequenz mit linearem Zeitwachstum bei wachsender Komplexität der Produkte als reine Optimierung der vorher gewichteten Sequenzen erfolgt.

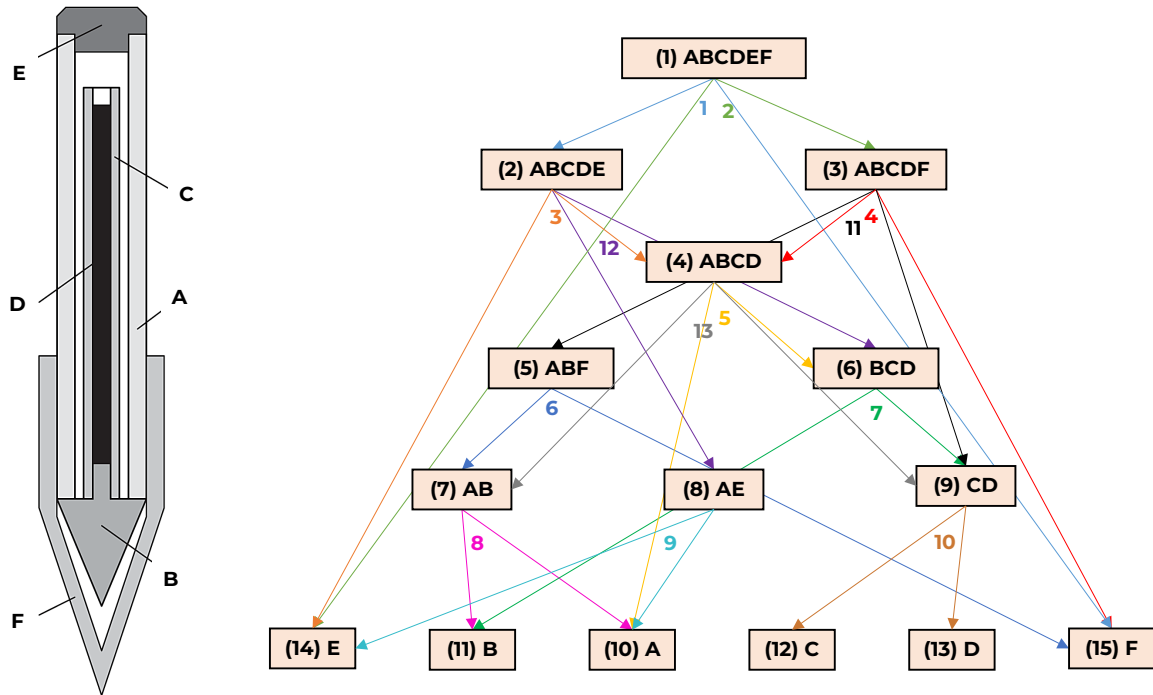


Abbildung 4.13: Bourjault-Stift mit Demontage-AND/OR-Graphen in der Notation nach Lambert [229] und Guo et al. [209]

Objekt für die allgemeine Modellierung der Methodik soll der *Bourjault-Stift* nach Lambert [229] sein, der in zahlreichen Untersuchungen für die Illustration von Montage- und Demontageproblemen verwendet wird und durch die ausschließliche Berücksichtigung von Unterkomponenten ohne dedizierte Verbindungselemente die *States* in der Demontageplanung von den *Sub-States* des *Operation Plan* (siehe DEU, 4.3.3) trennt, womit das hier vorgestellte Konzept der Trennung von Planung und Ausführung illustriert werden kann. Im Rahmen der Abgrenzung der jeweiligen Aufgabenbereiche im hier entwickelten Konzept muss dabei zwischen der Demontageplanung und der *Operationsplanung* (also der Planung des physischen Ausführungsvorgehens) unterscheiden werden. Aufgabe des RCP ist diesem Verständnis nach die globale Demontageplanung. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil der besseren allgemeinen Anwendbarkeit des RCP-Konzeptes, da die Beschränkungen der notwendigen Trennverfahren bauteilindividuell sind und vor allem im Bereich der Werkzeugplanung individuelle Konsequenzen erfordern. So kann das RCP-Konzept wie hier beschrieben grundsätzlich für beliebige Produkte verwendet werden.

Der in Abbildung 4.13 dargestellte AND/OR-Graph illustriert die aus dem Feature $Pr_{precPos}$ des Produktmodells hervorgehenden Vorrangrelationen des Produktes durch die Verknüpfung der Baugruppen und Komponenten. Jede Komponente wird dabei durch den korrespondierenden Buchstaben der jeweiligen Komponenten repräsentiert. Die Kästen stellen die jeweiligen Baugruppen dar, wobei die vorangestellte Nummer i entsprechend der Graphenstruktur vergeben die Ordnung der Baugruppen repräsentiert. Durch farblich differenzierte, gerichtete Bögen sind jeweils die möglichen Demontageoperationen j dargestellt. Die **AND**-Relation ist in dem Graphen durch die einheitliche Farbgebung der Bögen ausgehend von einer Baugruppe dargestellt: Aus Baugruppe (1) ABCDEF lassen sich mit Operation 1 die Baugruppen (2) ABCDE **und** (15) F erzeugen. Von der gleichen Elternbaugruppe ausgehend ist die **OR**-Relation hingegen durch die Verschiedenfarbigkeit der Operationen j gekennzeichnet: Es kann ausgehend von der Baugruppe (1) entweder die Operation 1 **oder** die Operation 2 ausgeführt werden. Damit beziehen sich AND-Relationen immer auf Zielbaugruppen und OR-Relationen auf Operationsalternativen.

Diese Verhältnisse der Operationen zueinander können in der Vorrangmatrix **S** dargestellt werden (siehe Abbildung 4.14, links). Hierbei gilt für die Zeilen j und die Spalten k die folgende Fallunterscheidung (Gleichung 7):

$$s_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Operation } k \text{ nach Operation } j \text{ ausgeführt werden kann,} \\ 0, & \text{falls nicht.} \end{cases} \quad (7)$$

Zum Beispiel können nach Operation $j=1$ die Operationen 3 oder 12 ausgeführt werden, weshalb $s_{1,3}=1$ und $s_{1,12}=1$ ist. Da die Vorrangmatrix **S** nur die Operationen berücksichtigt, wird in einem zweiten Schritt analog zu [209] eine Demontagematrix **D** erzeugt, für die gilt (Gleichung 8):

$$\mathbf{D} = D_{ij} = [d_{ij}] \text{ mit } d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Teil } i \text{ durch Operation } j \text{ gewonnen wird,} \\ -1, & \text{wenn Teil } i \text{ durch Operation } j \text{ demontiert wird,} \\ 0, & \text{falls nicht verknüpft.} \end{cases} \quad (8)$$

Wie in Abbildung 4.14, rechts, ersichtlich ist in der Demontagematrix das Verhältnis zwischen den gemäß den Vorrangrelationen möglichen Operationen und den resultierenden Baugruppen und Komponenten abgebildet. Zum Beispiel werden Baugruppe (2) und Baugruppe (15) durch Operation 1 gewonnen und Baugruppe (1) durch Operation 1 demontiert (daher die -1 in der Matrix). Die Baugruppe (15) kann als Komponente F so beispielsweise durch die Operationen 1, 4 oder 6 gewonnen werden. Die Demontagematrix enthält damit den vollständigen Informationsumfang zum Demontageprozess aus dem produktspezifischen AND/OR-Graphen. Ist das Zielbauteil bekannt, können so iterativ die möglichen Sequenzen bestimmt werden. Für Baugruppe (15) sind beispielsweise die Baugruppen (1), (3) und (5) valide Elternbaugruppen. Die Baugruppe (3) hat wiederum die Baugruppe (1) als Elternbaugruppe und die Baugruppe (5) die Elternbaugruppe (4), welche wiederum die Elternbaugruppe (2) oder (3) hat, die beide von Baugruppe (1) abstammen. Da sich nur durch die Operationsfolge eine Sequenz eindeutig angeben lässt, sind die damit möglichen Sequenzen zur Demontage der Baugruppe (15) die Optionen $0 \rightarrow 1$; $0 \rightarrow 2 \rightarrow 4$; $0 \rightarrow 2 \rightarrow 11 \rightarrow 6$. Eine Folge aus Baugruppen bestehend ist hingegen nicht eindeutig, da die Operation zur Gewinnung von Baugruppe (2), die Operation 1, bereits die Baugruppe (15) als Nebenprodukt hat, der Pfad also nicht möglich ist, da das selbe Bauteil nicht zweimal demontiert werden kann. Die virtuelle Operation 0 wird als Ausgangslage (*Initial State*) und aus Berechnungsgründen im Algorithmus hinzugefügt. Um in dieser Menge an möglichen Pfadsequenzen den tatsächlichen Demontagepfad zu bestimmen, wird die binäre Variable x_j als *Pfadbestimmungsvariable* eingeführt, die $x_j=1$ ist, wenn Operation j in der Sequenz potenziell ausgeführt wird. Ziel ist es nun, die möglichen Sequenzen nach ihrem größtmöglichen Nutzen zu ordnen.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Abbildung 4.14: Exemplarische Vorrangmatrix **S** und Demontagematrix **D** für den Bourjault-Stift

Da wie bereits im Abschnitt zur Demontageentscheidung beschrieben ein wichtiges Merkmal dieser Arbeit die Berücksichtigung aller Zielaspekte der Nachhaltigkeit sein soll und der Vorteil der Graphenmethode nach *Lambert* nur praktikabel ist, wenn keine Entscheidungsannahmen mehr in der Sequenzplanung getroffen werden müssen, soll die Priorisierung der möglichen Sequenzen das Ergebnis des Entscheidungsmoduls abbilden und das EoL-Verwertungsziel der Baugruppen berücksichtigen. Gewählt werden soll dann die Sequenz, die die größte skalare Zielerreichung Z im Sinne der Ausführung der getroffenen Entscheidungen bietet. Dafür werden die Sequenzen aufsummiert, wobei die Baugruppen einer Wertfunktion R_i folgend gewichtet werden (Gleichung 9):

$$Z = \sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^N R_i D_{ij} x_j \quad (9)$$

Die Wertfunktion R_i beschreibt dabei abhängig von der bauteilindividuellen Verwertungsoption folgende Werte (Gleichung 10):

$$R_i = \begin{cases} 0, & \text{für die Option Disposal (keine Demontage),} \\ 1, & \text{für die Option Recycle (Demontage),} \\ \frac{h_{\max}}{h_i} + 0.5, & \text{für die Option Reuse (Demontage).} \end{cases} \quad (10)$$

Die Entscheidung gegen eine Demontage setzt den Gesamtwert für eine Baugruppe auf 0, und beendet die Sequenz mit Bauteil i , da eine Entscheidung gegen die Demontage bereits berücksichtigt, dass auch die vorhandenen Unterbaugruppen voraussichtlich keine sinnvollen Erträge bringen (gibt das Entscheidungsmodul beispielsweise „2“¹³ für ein Steuergerät, ist davon auszugehen, dass auch weitere Unterbaugruppen wie z. B. Platinen nicht sinnvoll und zielgerichtet weiter demontiert werden können). Der Wert 1 spiegelt den Regelfall der Demontage mit dem Verwertungsziel des Recyclings wieder und wird neutral aber konstant gewichtet. Die Demontage einer Baugruppe mit dem Zweck der Wiederverwendung (Option *Reuse*) wird in Abhängigkeit der Hierarchieebene der betreffenden Baugruppe gewichtet, da es im Regelfall sinnvoll ist, ein größtmögliches Modul unter Erhalt der funktionellen Integrität wiederzuverwenden und damit die in dem Produkt steckende Wertschöpfung zu erhalten. Hierfür wird der Quotient aus der maximalen Hierarchieebene h_{\max} zur aktuellen Hierarchieebene der Baugruppe h_i gebildet und mit 0,5 addiert, um bei Gleichwertigkeit die grundsätzliche Präferenz der Wiederverwendung gegenüber dem Recycling zu berücksichtigen. Auch nach der *Reuse*-Option wird die Sequenz beendet, da alle tieferen Hierarchieebenen im Bauteil erhalten bleiben. Die maximale Hierarchieebene lässt sich aus der Demontagematrix und der potenziellen Zielsequenz bestimmen.

Es ist zwar umgekehrt ebenfalls eine Verbesserung bei der Qualität des Recyclingoutputs festzustellen, je tiefer die demontierte Ebene ist, jedoch soll dieser Umstand hier nicht extra gewichtet werden, da der Aufwand für Demontageoptionen in tiefen Hierarchieebenen oft wirtschaftlich in keinem Verhältnis zu den Erträgen steht. In Bezug auf Produkte mit sehr wertvollen Materialfraktionen kann diese Gewichtung bei der Sequenzplanung jedoch eingeführt werden, wenn sichergestellt ist, dass die technischen Prozesse für eine Demontage im Anlagenkonzept verfügbar sind.

¹³ Die Werte der Funktion R_i für die unterschiedlichen EoL-Optionen sind dabei nicht mit den Ergebniswerten des Entscheidungsmoduls zu verwechseln (hier sind die Optionen für Reuse „0“ und keiner individuellen Verwertung „2“ und können bei oberflächlicher Betrachtung leicht mit den Berechnungskonventionen für Z vertauscht werden).

Die Sequenz mit dem größten Zielerreichungswert (Z_{max}) wird verfolgt und das erste Glied der Sequenz vom ausgehenden State an die DEU weitergegeben. Bei einer Gleichwertigkeit zwischen mehreren Sequenzen, wird die Sequenz auf dem früheren Listenplatz weitergegeben. Die Prüfung und Bewertung der Sequenzen erfolgt dann für die weiteren Baugruppen zyklisch nach Abfrage des Demontageerfolges durch den Unterprozess des *StateTransitionManager* und damit einer erneuten Prüfung der Demontageumgebung und des Execution Monitoring. Die Auswahl der Sequenz ist damit keine Entscheidung, da die Werte in der Matrix bereits feststehen und nur eine Ordnung nach dem besten Pfad erfolgt und keine zu verifizierenden Annahmen mehr getroffen werden müssen. Der Algorithmus für den Gesamtprozess der optimierten Sequenzplanung ist in Tabelle 4.7 detailliert beschrieben.

Tabelle 4.7: Algorithmus der Sequenzplanungs-Funktion des RCP im Pseudocode

```

function SEQUENZPLANUNG[DisassemblyPartData, State] returns Disassemble(i) to DEU
-----stage1-----
load DisassemblyPartData(Product)
create Precedence-Matrix S from DisassemblyPartData(Product) //mögliche Operationen
create Disassembly-Matrix D from S and  $N_{\text{parts}}(\textit{Product})$  //in Bezug auf die Teile
//an diesem Punkt ist die Menge der nach Vorrangrelationen möglichen Sequenzen bekannt
calculate list Sq of possible sequences from D //Kombinatorischer Ansatz
-----stage2-----

//Bewertung der Sequenzen
for each  $sq_k$  in Sq do:
  for all j in  $sq_k$  with  $x_j=1$  do:
    calculate Z for each part i in  $D_{ij}x_j$  //Bestimmung des Sequenzwertes nach Gleichung 9
    for  $i=i_{\text{max}}-n$  in  $D_{ij}x_j$  do: //Prüfung EoL-Option der Bauteile in der Hierarchie aufsteigend
      if  $R_i=0$  //Bei "Option 2" für das Bauteil am Ende der Sequenz
        delete j for  $d_{i \rightarrow j}$  from  $sq_k$  //wird der letzte Schritt gelöscht
        set  $n=0$  and  $i=i_{\text{max}}$  //Bei Löschung weitere Prüfung mit neuem  $i_{\text{max}}$ 
      elseif  $R_i \geq 1$  //Bei "Reuse" für ein Bauteil werden alle in der Hierarchie
        delete j for  $d_{(i \rightarrow n)j}$  from  $sq_k$  //tiefer liegenden Bauteile aus der Sequenz gelöscht
        else set  $n=n+1$  //Falls  $R_i=1$  wird das nächste Bauteil geprüft
      save  $Z_k$  to list  $L_z$  for each  $sq_k$  //Liste  $L_z$  enthält die ggf. gekürzte Sequenz aus Operationen
        und Bauteilen mit Bewertung

//Auswahl beste Sequenz
find  $Z_{\text{max}}$  in  $L_z$ 
return  $sq_{Z_{\text{max}}}$  from  $L_z$  for  $Z_{\text{max}}$ 
//Umsetzung und Weitergabe an DEU
send  $sq_{Z_{\text{max}}}$  to StateTransition Manager
receive State( $sq_{Z_{\text{max}}}$ ) from StateTransitionManager //Abfrage des Ausführungsmanagements
return Disassemble to DEU for i in State( $sq_{Z_{\text{max}}}$ ) //Demontagebefehl an DEU für Teil i
run cyclic: //Zyklische Überwachung der Demontage
  receive State( $sq_{Z_{\text{max}}}$ ) from StateTransitionManager
  if State( $sq_{Z_{\text{max}}}$ )=State( $sq_{Z_{\text{max}}}(i+1)$ ) //Wenn die Demontage ausgeführt wurde,
    proceed to return Disassemble for i+1 //wird das nächste Teil/Baugruppe demontiert
  elseif State( $sq_{Z_{\text{max}}}$ )=failed //Tritt ein unlösbarer Konflikt auf, so wird eine
    delete  $sq_{Z_{\text{max}}}$  from  $L_z$  //Alternative bestehend aus der nächstbesten Sequenz
    goto find  $Z_{\text{max}}$  in  $L_z$  //ausprobiert

```


Es kann bei der Sequenzplanung auf diese Weise vorkommen, dass eine Baugruppe ohne individuelle Prozesseignung (EoL-Option 2) trotzdem demontiert wird, da sie der Sequenz mit Maximalbewertung die Voraussetzung zur Demontage tiefer liegender Baugruppen und Komponenten ist. Das Konzept der Hierarchieebenen ist wichtig, um das Problem der Möglichkeiten durch parallele Operationen zu begrenzen. Dafür muss in der Planung der aktuelle Demontagestand ermittelt werden. Eine wichtige Hilfsfunktion für die Sequenzplanung und das Ausführungsmanagement in Verbindung mit der DEU und der SPU ist daher der *StateTransitionManager*, welcher den aktuellen Ausführungsstatus der Demontage überwacht. Da die Vorrangrelationen in der Demontage nicht zwingend denen des ursprünglichen Produktmodells entsprechen müssen, ist ein dynamisches Konfliktmanagement erforderlich. Diese direkte Verzahnung von Planungs- und Ausführungsmanagement ist in vielen bisherigen Ansätzen nicht berücksichtigt (z. B. bei [230–232]). Die Funktion ist in Tabelle 4.8 dargestellt.

Tabelle 4.8: Algorithmus des *StateTransitionManagers* im Pseudocode

```
function StateTransitionManager[sqzmax, DisassemblyPartData, DisassemblyResult] returns State,
SubState, Ready, HMIInteraction
    load DisassemblyPartData(Product)
    init StateChange=true
    init State[PartData, Operations]
    init SubState[Operation, Fasteners]
    //Verknüpfung des Initial State
    receive target sequence sqzmax from SEQUENZPLANUNG
    set State=sqzmax(j0)
    set SubState(jn)=0
    //Abgleich mit SPU und Bestätigung Status an DEU
    while StateChange=true do:
        for all i in State: //Identifikation und Detektion der Bauteile
            receive NodeID from DisassemblyPartData
            receive Position from SPU
            if Position=irregular
                return HMIInteraction to DEU
            save to State
        for jn in State: //für dem Bauteil zugeordnete Operationen werden die Verbinder detektiert
            receive Screws from DisassemblyPartData
            receive Position from SPU
            save to SubState
            return SubState to DEU //Rückgabe der SubStates für Operationsplanung an DEU
    set StateChange=false
    return Ready to DEU //Systemstatus erfasst, bereit für Ausführung
    run cyclic: // Ausführungsüberwachung
        for i in State(jn):
            receive Success from DisassemblyResult
            if Success=true
                set StateChange=true
            elseif Success=false
                set exception for State(jn)=failed
    return State to SEQUENZPLANUNG //Rückmeldung an SEQUENZPLANUNG
```


Bei der Definition des *InitialState* wird die virtuelle Operation $j=0$ als erste Stelle der Zielsequenz angenommen und es erfolgt daraufhin eine optische Auswertung der Demontageumgebung, bei der die detektierten Bauteile der Baugruppe $i(j_0)$ im State zugeordnet werden. Entspricht der Umfang der detektierten Bauteile nicht dem Informationsstand im ursprünglichen Datenmodell für die Bauteile bei $j=0$ aus der Zielsequenz, so wird der folgende Zustand für $j=1$ aus der Sequenz geprüft (und so weiter), und der State angepasst, falls das Bauteil bereits entfernt wurden ist. Fehlt hingegen ein Bauteil, das nicht gemäß einer Operation aus der gültigen Sequenz demontiert werden konnte, so wird der Konflikt an das HMI weitergegeben und muss durch einen manuellen Statuseintrag beseitigt werden.

Da der RCP nur für den globalen Planungsprozess der Demontage zuständig ist, wird die spezifische Operationsplanung in der DEU festgelegt. Die Methodenauswahl zur Demontage in Bezug auf das Werkzeugmanagement sowie die Prüfung der Verfügbarkeit der einzelnen Anlagensegmente sind ebenfalls Aufgabe der DEU. Der als zu demontieren betrachtete Teileumfang *Product* aus dem Gesamtprodukt heraus muss so gewählt werden, dass die Berechnungszeit der möglichen Sequenzen mit dem Entscheidungsprozess nicht zu hoch wird. Das Splitting der Umfänge wurde bereits von *Lambert et al.* [226] vorgeschlagen, um den Rechenaufwand einzugrenzen. Für baugleiche Produkte (Typen) kann dieses Set möglicher Sequenzen gespeichert werden, um bei wiederholter Demontage Zeit einzusparen. Ein theoretisches, unendlich komplexes Bauteil kann mit der kombinatorischen Methodik zur Bestimmung der möglichen Sequenzen nicht berechnet werden, kommt in der Praxis jedoch auch nicht vor. Die praktische Nutzbarkeit der Vorgehensweise für Produkte mit begrenzter Komplexität wurde bereits 1990 für die Montageplanung nachgewiesen, wobei die Effizienz gegenüber statischen Anleitungen besser ausfiel (das aus 10 Komponenten bestehende Bauteil hatte einen Lösungsraum von 243.302 möglichen Sequenzen) [233]. Die hier gewählte Vorgehensweise mit einem übergeordneten Datenmodell (siehe 4.4) erlaubt eine beliebige Konfiguration der Größe der Planungsgruppe. Im Vergleich zur Ausführungsüberwachung bei *Vongbunyong et al.* [75] ist es hier überdies nicht notwendig, den Prüfbereich auf eine kleinere Ausführungsregion zu limitieren, da Identifikation und Detektion der Bauteile durch die SPU nicht mehr über rein konturbasierte Verfahren ausgeführt werden, sondern die Bilderkennungs-KI (siehe 4.3.2) die Bauteile des Produktes bereits individuell erlernt hat.

Für die Operationsplanung in der DEU werden ebenfalls die *SubStates* der Demontage eines Bauteils kontinuierlich abgefragt. In dem hier gezeigten Konzept handelt es sich bei den Sub-States um die Verbindungselemente der betrachteten Bauteile (hier am Beispiel von Schrauben – andere Datentypen für Verbindungselemente, auch in Bezug auf teilweise zerstörende Demontage, können im Datenmodell ergänzt werden). Relationen können ebenfalls über Abgleich der Koordinaten aus der SPU ermittelt werden, wenn erkannte Verbinder innerhalb einer Hauptkomponente liegen, da in einem State immer sowohl die Komponente (Datenmodell) als auch die Position der Verbindungselemente übertragen werden. Durch eine Messung der Zeitintervalle zwischen den Veränderungen der *StateChange*-Variable kann überdies die tatsächliche Demontagezeit für eine Baugruppe validiert werden, sofern die zyklische Abtaste des Prozesses vernachlässigbar klein im Verhältnis zu der Demontagezeit ist.

Zusammenfassend bildet der RCP das vollständige Aufgabenspektrum der zentralen Planungs- und Steuerungseinheit des Systemkonzeptes ab. Durch die Verknüpfung der Produkt- und Prozessdaten mit dem übergreifenden Informationsmodell ist eine individuelle Entscheidung und selektive Sequenzplanung möglich, mit deren Hilfe eine optimierte Demontage für die Zieldimensionen der nachhaltigen Verwertungsstrategie erreicht werden soll. Durch die Auslegung als lernfähiges System passt sich die Demontageanlage veränderten Bedingungen an und verbessert die Prozessergebnisse kontinuierlich.

4.3.2 Die System Perception Unit

Die *System Perception Unit* (SPU) ist das Wahrnehmungszentrum des Demontagekonzeptes. Dieser Systemagent ermöglicht die Erfassung der Umwelt, um auf diese Weise Hauptkomponenten, Verbinder, den Arbeitsfortschritt und die Mitarbeitenden in der hybriden Demontagezelle wahrzunehmen. Der Einsatz von Bilderkennungssystemen im Bereich der Demontageautomatisierung spielte von Beginn an eine wichtige Rolle. Frühe Konzepte, wie von *Büker et al.* [234], bei dem mit Hilfe einer vision-basierten Regelung und einem Kraft-/Momentensensor automatisch Fahrzeugräder demontiert werden, oder technisch weiter entwickelte Methoden, wie von *DiFilippo et al.* [151], nutzen die Bilderkennung zur Lokalisierung der zu bearbeitenden Bauteile und somit als direktes *Wahrnehmungsorgan* der Ausführungseinheit. Hierbei sind oft ebenfalls Technologien wie die Sensorfusion mit taktil erfassten Daten aus dem Ausführungssystem wichtig oder es werden Umgebungsinformationen aus multiplen Sensorquellen erzeugt [96]. Da die taktilen Funktionen in diesem Konzept über die Roboter und die Werkzeugeinheit abgebildet werden, gehören sie zur DEU und werden im entsprechenden Unterkapitel behandelt. Die Weitergabe der aus den Bilderfassungsdaten extrahierten Informationen an RCP und DEU ist der Beitrag der SPU zum Gesamtergebnis einer erfolgreichen Demontage.

Die Hauptfunktionen der SPU sind daher:

- **Identifikation,**
- **Detektion,**
- **Bewertung und**
- **Arbeitsraumüberwachung.**

Die Identifikation der Bauteile sowie deren Detektion in Bezug auf das Referenzkoordinatensystem der Robotereinheit sind klassische Vision-Aufgaben, wie sie auch in produzierenden Bereichen gefunden werden kann. Eine besondere Position im aktiven Teil des Informationsmanagements der Kreislaufwirtschaft nimmt die Bewertung der Bauteile ein, da der Demontagebetrieb die EoL-Komponenten erstmalig direkt begutachten kann. Die Ergebnisse der Bewertung sollen daher auch an die anderen Systemmodule sowie die übergeordnete Datenstruktur weitergegeben werden.

Die in Tabelle 4.9 dargestellte PEAS-Beschreibung fasst den Arbeitskontext der SPU zusammen. Mit der gewählten Sensorstrategie gilt die Umwelt als teilweise observierbar, da bestimmte Strukturen durch andere Objekte im Sichtbereich des Kamerasystems verdeckt sein können. Das System ist grundsätzlich als kooperatives Multi-Agenten-System umsetzbar, da eine beliebige Anzahl an Kamerasystemen zumindest technisch uneingeschränkt möglich ist. Die Systemperformance kann primär anhand der Genauigkeiten und Reaktionszeiten der verwendeten Techniken in Bezug auf die Hauptfunktionen bestimmt werden.

Tabelle 4.9: PEAS-Beschreibung der SPU

Agent	Performance Measure	Environment	Actuators	Sensors
System Perception Unit (SPU)	Genauigkeit der Erkennung Genauigkeit der Position Geschwindigkeit Verlässlichkeit der Bewertung Reaktionszeit der Arbeitsraumüberwachung	Demontageobjekt Robotersystem Mensch	-	3D-Kamerasystem mit Bilderkennung und Stereovision

Die Umsetzungsaufgabe der Funktionen im Sinne der Anforderungen aus 4.1 erfordert eine Differenzierung von Hauptkomponenten und Verbindungselementen sowie eine Zuordnung der optisch erkennbaren Elemente zu den jeweiligen Komponenten des Produktmodells. Für diese Elemente müssen dann die Koordinaten in Abhängigkeit von der Kamera gemessen und nach einer Transformation auf das Basiskoordinatensystem des Roboters an die DEU weitergegeben werden. Ferner ist für jede differenziert erkennbare Komponente eine optische Bewertung in Bezug auf sichtbare Mängel erforderlich. Bildoptische Analysen hinsichtlich der Bauteilqualität können dabei neben der Erkennung auch die Vollständigkeitsprüfung, die Lageerkennung, die Form- und Maßprüfung sowie die Oberflächeninspektion einschließen [235].

Klassische Bildverarbeitungstechniken können zur Erfüllung dieser technischen Anforderungen verwendet werden. In der Vergangenheit wurden so z. B. bei *Vongbunyong* [76] Systeme entwickelt, die über die Gemeinsamkeiten in der Konturerkennung objektspezifisch eine Identifikation differenzierter Klassen ermöglichten. Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass jedes Objekt einen spezifischen Erkennungsalgorithmus benötigt und somit der Aufwand eine derartige Anlage zu erweitern oder zu verändern relativ hoch ist. Ein Vorteil kann hingegen sein, dass für neue Varianten *ähnliche* Bauteilgruppen erkannt werden können, da sich die Gemeinsamkeiten der Unterkomponenten dort wiederfinden. Vor dem Hintergrund der heutigen technischen Möglichkeiten, vor allem einer rapiden Steigerung der pro Watt Leistung verfügbaren Rechenkapazität, ist der Einsatz von Bilderkennungs-KI naheliegend. Hier wurden seit ca. 2013 massive Fortschritte beim Einsatz künstlicher, tiefer neuronaler Netze (Engl. *Deep Neural Networks*, DNN) gemacht [148]. Sind beispielsweise im Rahmen des Informationsmanagements CAD-Daten vorhanden, ist es möglich, die Erkennung der Komponenten automatisiert auf Basis dieser digitalen Modelle durchzuführen [236]. Wenn keine 3D-CAD Daten verfügbar sind, so können neue Komponenten über diverse, leicht zu bedienende Softwareprogramme gelabelt werden, wodurch sowohl Produkthersteller als auch Demonteure oder andere Stakeholder die Möglichkeit hätten die digitalen Informationsmodelle um diese visuellen Informationen anzureichern. Der hierfür erforderliche exemplarische Trainingsprozess wird unter dem Punkt *Identifikation* näher erläutert.

Identifikation

In der klassischen Bildverarbeitung werden gesuchte Objekte durch ein bekanntes, deterministisches Signal beschrieben [146]. Die Identifikation von Objekten erfolgt dann auf Basis der Erkennung von Objektmerkmalen im Bereich des Bildverstehens. *Deep Learning* (DL) als State-of-the-Art Identifikationsverfahren integriert die Merkmalsextraktion und die Klassifikation innerhalb des verwendeten Modells. Um diese Modelle in Bezug auf den Anwendungskontext anzupassen und die Klassifizierung der Objekte zu erlernen, muss eines der in Kapitel 2.4 vorgestellten Trainingsverfahren verwendet werden. Die Extraktion der Merkmale erfolgt dabei automatisch. Für die Identifikation von Objekten durch die SPU soll daher ein CNN-Modell verwendet werden.

Bei Betrachtung des Aufbaus einer klassischen CNN-Architektur (siehe Abbildung 4.15) ist es die *Faltung*¹⁴ im *Convolutional Layer*, die mit Hilfe von 2D-Kernel-Filtern einen dreidimensionalen Output aus den zweidimensionalen Bildmatrizen erzeugt [124]. Diese Filter haben eine festgelegte Pixelgröße und scannen den Bildbereich in einer konstanten Schrittweite. Im Ergebnis dieser Faltungsoperation entsteht eine kleinere Ergebnismatrix mit den wichtigsten Informationen des gescannten Bildbereichs. Das im Anschluss durchgeführte *Pooling* aggregiert diese Ergebnisse, indem jeweils der Mittelwert oder

¹⁴ Eine Faltung bezeichnet im Rahmen der Bildverarbeitung ein Filter, das mit Hilfe einer quadratischen Matrix aus dem Inputwert mittels einer linearen Operation eine gewichtete Ausgangsfunktion erzeugt.

das stärkste Signal weitergegeben wird. Diese Folge wird abhängig von der konkreten Architektur mehrfach wiederholt, um so ein abstrahiertes, ortsunabhängiges und verdichtetes Signal zu erhalten. Dieses Signal wird daraufhin als ausgerollter (sog. *Flattening*¹⁵) Input für ein klassisches NN verwendet, indem eine Klassifizierung der zu erkennenden Objekte erfolgt.

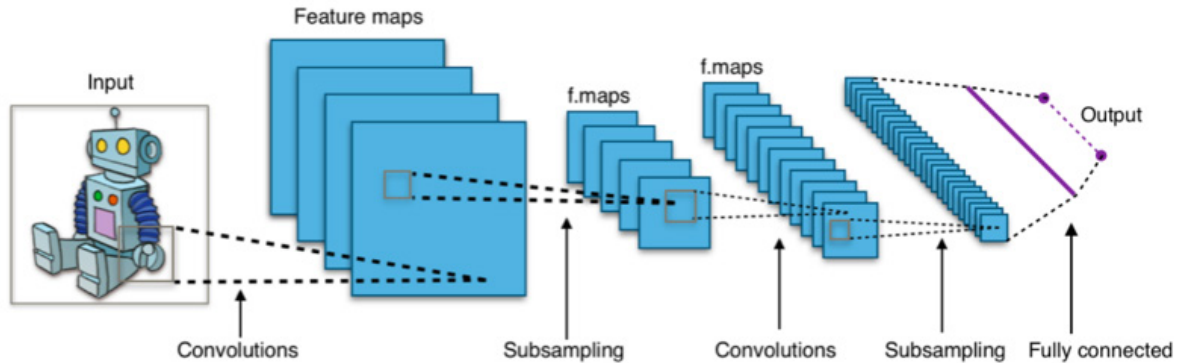


Abbildung 4.15: Typische CNN Architektur [237]

Da die Entwicklung von Deep-Learning Architekturen zur Bilderkennung ein eigenes Forschungsgebiet darstellt, soll im Rahmen dieser Arbeit ein bestehendes und öffentlich verfügbares Modell verwendet und für den Zweck der Anwendung trainiert werden. Hierbei soll auch auf bereits vortrainierte Modelle zurückgegriffen werden. Dieses *Transfer Learning* genannte Prinzip zeigt dabei eine hohe Performance, da das Netz bereits erlernte Gewichtungen auf die Strukturen der neuen Klassen übertragen kann [238].

Ein vorrangiger Auswahlfaktor ist die Genauigkeit des Modells, anhand dessen sich die verfügbaren Netzstrukturen vergleichen lassen [124]. Die mittlere Genauigkeit (mAP, Engl. *mean average precision*) beschreibt den Mittelwert der durchschnittlichen Genauigkeit für jede zu erkennende Klasse. Die durchschnittliche Genauigkeit (AP, Gleichung 11) ist dabei das Integral der *Precision-Recall-Funktion*:

$$AP = \int_0^1 p(r) dr \quad (11)$$

Die Genauigkeit (*Precision*) ist hier das Verhältnis der *true positives* (TP) zu der Gesamtmenge der für eine Klasse klassifizierten Elemente (Gleichung 12):

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (12)$$

Der Abruf (*Recall*) ist das in Gleichung 13 gezeigte Verhältnis der Beispiele einer klassifizierten Klasse zur Gesamtmenge an Beispielen der Klasse in der gesamten Menge der Samples:

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

Auf Grundlage dieser Werte kann für eine Referenzmenge an Beispielen, z. B. die COCO¹⁶-Datenbank [239], ein direkter Vergleich unterschiedlicher Architekturen erfolgen. Dabei wird der mAP-Wert oft für unterschiedlich große Objekte angegeben. Einen Rückschluss auf die absolute Performance einer Netzarchitektur in einer konkreten Anwendung mit spezifischen Klassen lässt sich aus dem mAP nicht

¹⁵ Konvertierung in einen Vektor, um hochdimensionalen Input zu verarbeiten.

¹⁶ COCO = *Common Objects in Context*

herleiten, da das Verhalten in einer realen Umgebung aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren stark von den Ergebnissen dieser Referenzdatensets abweicht.

Die Auswahl einer geeigneten Architektur zur Objekterkennung hängt neben der allgemeinen Genauigkeit von den zu erkennenden Objektgrößen sowie der erforderlichen Rechenleistung und damit dem erforderlichen Zeitaufwand ab. Im Fall der optischen Erfassung einer vollständigen Demontagezelle sind Verbindungselemente wie Schrauben sehr kleine Objekte im Verhältnis zum Gesamtbild. Gleichzeitig gibt es mit den Komponenten relativ große Objekte. Die Erkennung kleiner Objekte stellt eine große Herausforderung an den Detektionsalgorithmus dar und ist auf Grund der niedrigeren Informationsmenge (weniger Pixel) deutlich schwieriger [149]. Hier ist es vor allem der Bereich der regionsbezogenen CNN (*region proposal CNN*, auch *R-CNN*), der es ermöglicht, in annehmbaren Rechenzeiten sehr kleine Objekte in großen Gesamtszenen zuverlässig zu detektieren (vgl. [150]). In diesem Beispiel wird das Gesamtbild in sich überlappende Bereiche aufgeteilt. Hier erfolgt in einem zweistufigen Verfahren erst eine grundsätzliche Prüfung zum Vorhandensein des Zielobjektes und bei positivem Ergebnis der eigentliche Detektionsvorgang.

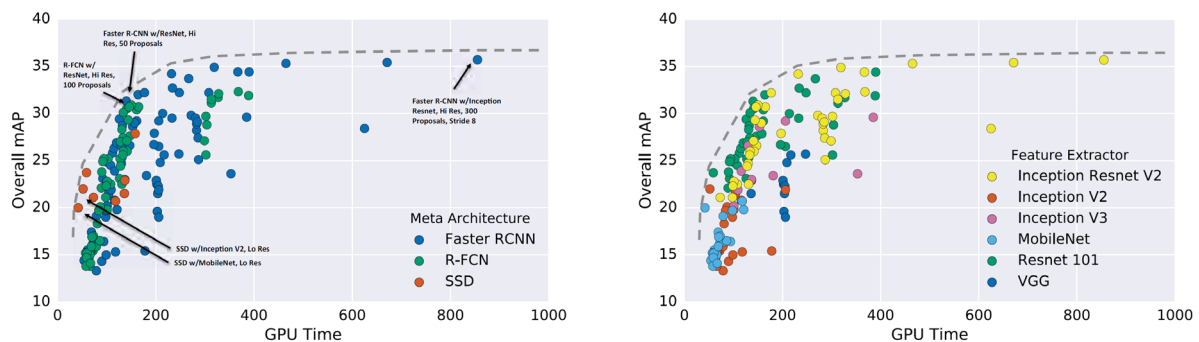


Abbildung 4.16: Genauigkeit zu Rechenaufwand für verschiedene Netzarchitekturen (links) und Modelle (rechts) [240]

Bei Betrachtung der Abbildung 4.16, links, wird deutlich, dass hinsichtlich der Anforderungen an Geschwindigkeit und den mAP vor allem die Architekturen *SSD* und *Faster R-CNN* die jeweils schnellsten oder genauesten Ergebnisse liefern [240]. *Single-Shot Detektoren* (SSD), bei denen prinzipbedingt die Bilder das Netz nur einmalig durchlaufen, bieten die höchsten Geschwindigkeiten und eignen sich daher vor allem für Anwendungen, in denen eine Identifikation in annähernd Echtzeit abzulaufen hat. R-CNN hingegen bieten die höchstmöglichen Genauigkeiten bei oft nur unerheblich höheren Rechenzeiten. Aus diesem Grund soll für die SPU ein R-CNN Modell verwendet werden, da eine hohe Genauigkeit und sichere Erkennung kleiner Objekte, wie z. B. Schrauben eine wichtige Grundanforderung abdeckt.

Die R-CNN bestehen dabei aus einem CNN und einem *Region Proposal Network* (RPN) [241]. Auf diese Weise kann die manuelle Auswahl einer *Region of Interest* (RoI) durch ein selektives Suchverhalten umgangen werden und es ist gleichzeitig möglich, in Bezug auf die Rechenleistung im Vergleich zu einem ähnlich aufgelösten CNN für einzelne Bildbereiche effizient zu bleiben. Bei einem R-CNN ist das RPN für die Auswahl einer Menge an potenziellen RoI zuständig. Für diese werden daraufhin jeweils mittels CNN Features berechnet, die dann in einem weiteren Schritt durch eine *Support-Vector-Machine* (SVM, siehe 2.4) klassifiziert werden können. Hierdurch werden mehrere, jedoch kleinere Bereiche betrachtet, was eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse begünstigt. Es kann ebenfalls gezeigt werden, dass ein Vorgewichtung durch ein allgemeines Training die Ergebnisse für spezifische Objekte deutlich verbessert [241]. Da diese Architektur im Vergleich zu SSD-Architekturen sehr langsam ist, sind Weiterentwicklungen dieses Prinzips mit einer zusätzlichen Verbesserung der Genauigkeit veröffentlicht worden. Das *Fast R-CNN* [242] verwendet das gesamte Bild als Input für ein CNN um eine

globale *Feature-Map* zu erstellen. Aus dieser werden daraufhin durch einen Suchalgorithmus RoI vorgeschlagen, für welche eine Aggregation mittels *Pooling* in eine Matrix mit fester Größe (*Kernel-Size*) erfolgt. Diese kann dann mit Hilfe eines dichten NN mit *Softmax*-Aktivierung im letzten Layer für das Zielobjekt klassifiziert werden. Darüber hinaus wird ebenfalls die *Bounding-Box* (Rechteckige Begrenzung des Objektbereichs im Bild) zurückgegeben. Dieser Vorgang erfolgt für jede RoI. Der Vorteil liegt darin, dass der aufwändige Berechnungsschritt des CNN nicht für jede RoI erfolgt, sondern einmalig und dabei eine gesamtheitliche *Feature-Map* zur weiteren Berechnung erstellt wird. Um das Bottleneck der Regionsvorschläge, das nun den größten Teil der Ressourcen benötigt, zu verbessern, wurde von Ren et al. das *Faster R-CNN* entwickelt [243]. Wie in Abbildung 4.17 dargestellt, werden beim *Faster R-CNN* ähnlich zum *Fast R-CNN* in einem ersten Schritt gefaltete *Feature-Maps* erstellt. Anstelle einer Suche wird ein separates Netz verwendet um die RoI-Vorschläge vorauszusagen. Für diese Vorschläge werden jeweils translationsinvariante Ankerpunkte festgelegt. Das hat den Vorteil, dass der gleiche Vorschlag gefunden wird, auch wenn sich das Objekt im Bild bewegt. Diese RoI werden dann wiederum durch ein *Pooling* so transformiert, dass sie als Eingangsgröße für das Klassifizierungsnetz und den *Box-Regressor* verwendet werden können. Dieser Aufbau entspricht damit dem Vorschalten eines CNN für die Regionsauswahl vor einem *Fast R-CNN*. Damit können je nach Hardware, Bildgröße und Parametrierung auch Erkennungen in einem Livestream bei etwa 5 bis 17 Bildern pro Sekunde ausgeführt werden [243].

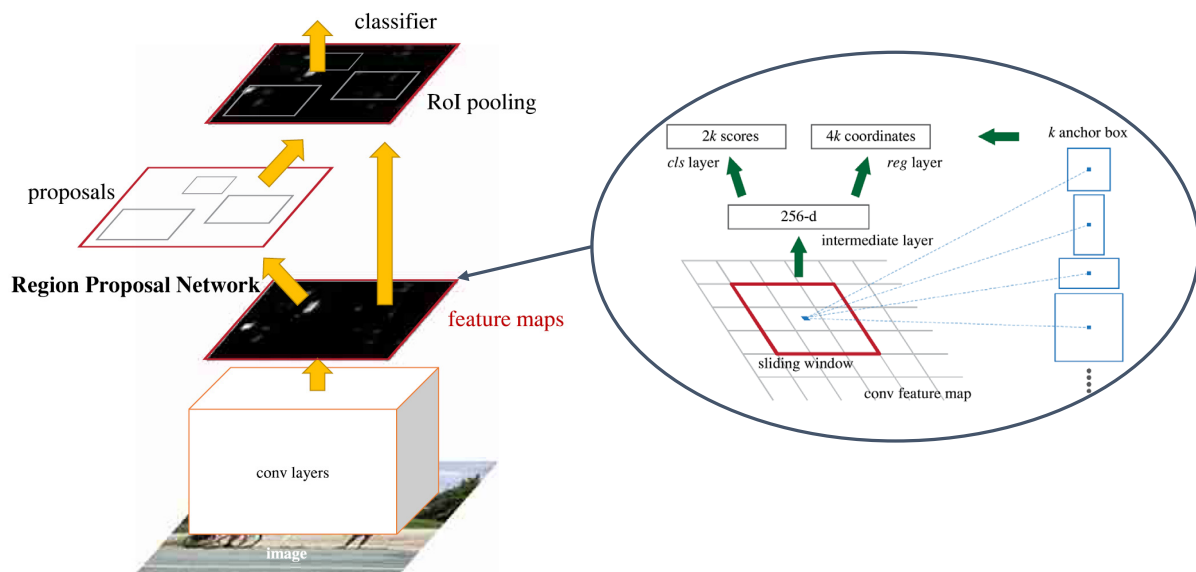


Abbildung 4.17: Funktionsprinzip und Architektur des *Faster R-CNN* nach [243]

Nach der Auswahl der grundlegenden Netzarchitektur muss ein geeigneter *Feature-Extractor* bestimmt werden. Die Aufgabe des *Feature-Extractors* im CNN Modell ist die automatische Festlegung der individuellen Erkennungsmerkmale, die bei klassischer CV manuell erfolgen muss. Damit ist der *Feature-Extractor* entscheidend für die Erkennungsqualität der Objekte durch die SPU. Zentrale Größe ist dabei die Menge an Layern, die das Lernverhalten verbessert, wobei jedoch architekturabhängig das *Vanishing Gradient Problem* auftreten kann. Hierbei werden bei gradientenbasierten Optimierungsfunktionen in den ersten Layern bei sehr tiefen Modellen die Gradienten derart klein, dass kein Lernfortschritt mehr möglich ist. Um dieses Problem zu umgehen, können nach He et al. [244] sog. *skip connections* verwendet werden, damit ein oder mehrere Layer, bezogen auf den Input, scheinbar übersprungen werden können. Diese als *ResNet* bezeichnete Verknüpfung addiert den Input eines Layers zu dessen Output (auch über mehrere Schichten) und erhöht damit das Moment für die Lernfunktion des Folgelayers.

ers durch die Veränderung dessen Inputs ohne eine Verfälschung der Informationsmenge. Dieses Verfahren kann jedoch nur für dimensionsgleichen Input und Output verwendet werden, da ansonsten eine zusätzliche Transformation erforderlich wäre, die im Netz nicht möglich ist. Ist die Dimension nicht gleich, können daher entweder durch ein *Zero-Padding* leere Werte für die zusätzlichen Zeilen und Spalten oder mittels 1x1 Pixel großen Faltungsfiltren passende Werte eingesetzt werden.

Ein allgemeiner Vergleich bei *Huang et al.* (vgl. Abbildung 4.16, rechts, [240]) sowie kontextbezogene Untersuchungen, z. B. von *Zhang et al.* [245], zeigen, dass ein *Inception ResNet V2* mit Transfer Learning Methoden im Bereich der genauen Erkennung kleiner Objekte in verschiedenen Umgebungen die beste Performance zeigt. Es sind zwar bereits genauere Netze verfügbar (z. B. *Faster R-CNN NASNet*, [246]), diese erfordern allerdings eine im Verhältnis zur Genauigkeitsverbesserung überproportional steigende Rechenkapazität, die nach dem Edge-Computing Prinzip bei der Konzeption der Systemagenten nicht zu rechtfertigen ist. Es wird daher das *Faster R-CNN Inception¹⁷ ResNet V2* mit *Atrous Convolutions¹⁸* und einer Vortrainierung mittels COCO-Bibliothek für die Erkennungsfunktion des SPU ausgewählt. Dieses Netz ist in Abbildung 4.18 visualisiert. Dargestellt sind hier auf der linken Seite der Aufbau des sog. *Stem-Netzes* für die Feature-Map vor der ersten Inception, rechts davon der allgemeine Aufbau der Layerstruktur und auf der linken Seite die Teilstrukturen der Inception-Blöcke.

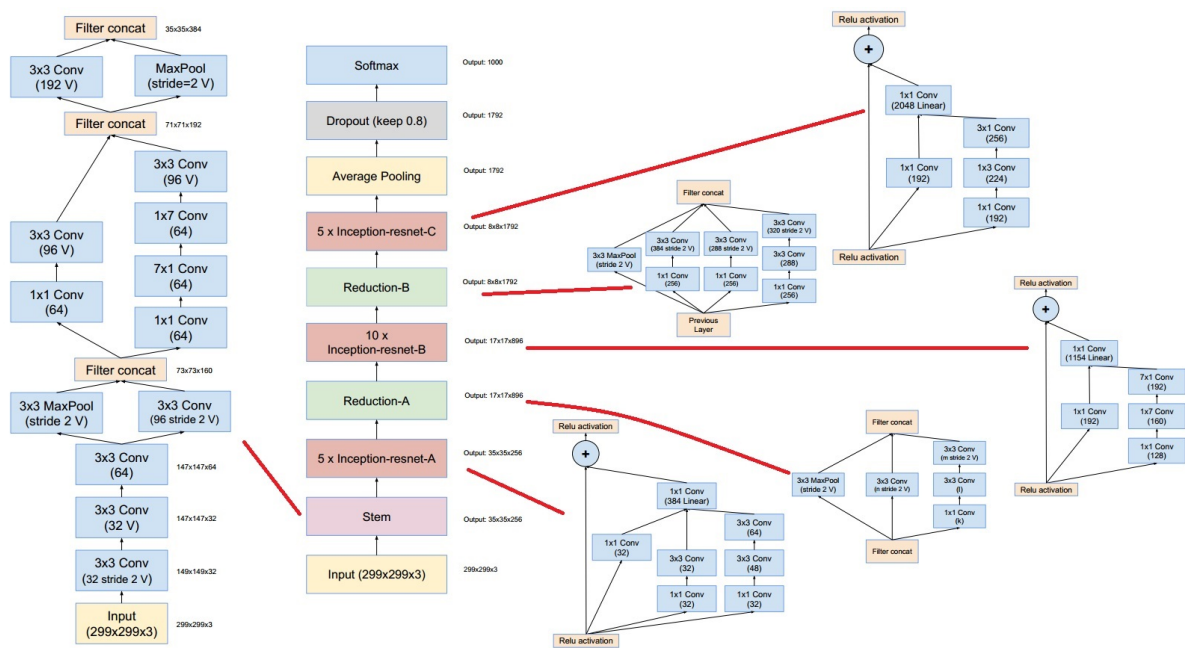


Abbildung 4.18: Struktur Faster R-CNN Inception ResNet V2 für die Identifikationsfunktion im SPU nach [247]

¹⁷ *Inception-Blöcke* [247]: In Verbindung mit ResNet Strukturen werden Inception-Blöcke verwendet, um den Bildbereich mit unterschiedlich großen Filtern zu durchsuchen, damit eine Bandbreite an verschiedenen großen Features effizienter erkannt werden kann. Bei einem Inception-Block handelt es sich um gestapelte Faltungen unterschiedlicher Kernel-Größen (in der Regel 1x1, 3x3 und 5x5), mit denen für tiefe Netzwerke eine signifikante Ersparnis in Bezug auf den Rechenaufwand bei einer Reduzierung der möglichen Überanpassung erreicht wird.

¹⁸ Von Franz. *à trous* = *lückenhaft*, geht es bei dieser diskreten Faltungsoperation um die Bestimmung des Ortes eines bestimmten Merkmals im Bild. Ein Dilationsfaktor legt dabei den Abstand (die Lücke) zwischen den Kernel-Punkten des Faltungsoperators fest (*à trous Algorithmus*) [248]. Diese Vorgehensweise vergrößert den Sichtbereich, ohne dabei mehr Rechenleistung zu verwenden. Die Lücken werden mittels *Zero-Padding* gefüllt.

Um das vortrainierte Modell nun im Kontext der Demontage verwenden zu können, muss im Rahmen des Transfer Learning ein Training der erforderlichen Objekte erfolgen. Da es sich bei der Lernweise des Faster R-CNN Inception ResNet V2 um ein überwachtes Lernen handelt, ist es für das Training erforderlich, dem Netz eine notwendige Menge an gelabelten Daten für die zu erlernenden Objekte zur Verfügung zu stellen. Diese Datenmenge muss für den Lernvorgang in eine Trainings- und Validierungsdatenmenge unterteilt werden. Die Trainingsdaten sollten dabei die Objekte aus unterschiedlichen Perspektiven, mit unterschiedlichen Lichtverhältnissen und vor abweichenden Hintergründen beinhalten. Da derartige Datensätze für spezifische technische Komponenten nicht öffentlich zugänglich vorliegen, muss die Erstellung manuell erfolgen. Diese Vorgehensweise führt zu einem hohen Zeitaufwand und damit verbunden zu hohen Kosten für eine umfassende Implementierung. Eine weitere Möglichkeit, die in Abhängigkeit der Qualität der verfügbaren digitalen Produktmodelle verfolgt werden kann, ist das Erzeugen von Trainingsdaten aus CAD-Modellen. Hierbei werden die 3D-Modelle vor synthetischen Hintergründen in verschiedenen Perspektiven und Lichtbedingungen zur Erzeugung virtueller Trainingsbilder verwendet (vgl. [249]). Auf diese Weise können in einem verknüpften Informationsmodell der Kreislaufwirtschaft die benötigten Trainingsdaten auf der Grundlage der CAD-Modelle der Hersteller erzeugt werden, was den Einsatz von Bilderkennungssystemen wie der hier beschriebenen SPU massiv fördern würde. Eine weitere Möglichkeit die Datenmenge zu erhöhen, ist die *Data-Augmentation* (siehe [250]). Hierbei kann es sich um Bildmanipulationen wie Farbveränderungen, Drehungen, Mischungen, geometrische Transformationen oder dem Löschen bestimmter Anteile sowie um die Veränderung von Bilddaten mittels spezifischer neuronaler Netze handeln. Dies kann ebenfalls zu einer Minimierung der Unterschiede zwischen Training und Validierung führen, da dieses Verfahren z. B. Überanpassung effektiv zu vermeiden hilft (durch eine Vergrößerung des Sets). Eine genaue Betrachtung der Trainingsergebnisse in Bezug auf die erzielbaren Genauigkeiten und ein Vergleich mit Messungen am realen Objekt erfolgt in Kapitel 5.3.

Detektion

Als zweite Funktionalität der SPU ist die Detektion der identifizierten Objekte im Arbeitsraum vorgesehen. Aus der gewählten Erkennungsmethodik wird bereits bei der Objekterkennung durch das neuronale Netz die Position des Objektes im Bildbereich bestimmt. Daher liegt der Hauptumfang der Detektionsaufgabe in der Bestimmung der Raumkoordinaten für den betreffenden Bildpunkt sowie die Transformation dieser Koordinate aus dem Referenzsystem der Kamera auf das Basiskoordinatensystem des Roboters sowie die Weitergabe an die DEU. Da für die Objekterkennung im Rahmen der Identifikation bereits ein Kamerabild erforderlich ist, soll für die Lokalisierung der Bauteile die *Stereovision* mit Hilfe einer zweiten Kamera genutzt werden.

Stereometrie ist ein indirekt messendes, optisches Messverfahren zur Bestimmung von Distanzen zwischen einem Objekt und einem Kamerasystem [146]. Im Verhältnis zu der Messung mit nur einer Kamera, muss die Größe des Objektes bei der Stereovision nicht bekannt sein. Es wird dabei aus zwei verschiedenen Bildern eine 3D-Rekonstruktion des Aufnahmebereichs errechnet. Wichtig dafür ist, dass sowohl der Abstand der beiden Kameras, als auch deren optische Parameter bekannt sind. Weiterhin ist für eine hinreichende Genauigkeit des Systems eine Kalibrierung erforderlich. Im Detail können sich die Verfahren unterscheiden, die gängigsten Varianten sind die aktive Stereometrie mit Infrarot oder die passive Stereometrie [251]. Beim passiven Verfahren erfolgt die Berechnung der Objektdisparität über Kanten, bei der aktiven Stereometrie werden Muster auf das Objekt projiziert, sodass auch für Flächen eine genaue Distanzberechnung möglich wird.

Da die Kameras in der Praxis nicht exakt gefertigt und auch nicht parallel angeordnet sind, ist eine Kalibrierung unumgänglich. Eine schrittweise Beschreibung der praktischen Umsetzung der Kamera-kalibrierung mittels der Open-Source Bibliothek *OpenCV* findet sich bei *Wang et al.* [252]. Hierfür ist eine Kalibrierungsplatte mit definiertem Referenzmuster mit exakten Kantenlängen erforderlich. Anhand der auf diese Weise bestimmten *Entzerrungskoeffizienten* (extrinsische Parameter) können dann radiale und tangentielle Verzeichnungen aus dem Bild entfernt werden. Sind die Kameras an sich kalibriert um linsen- und sensorbedingte Fehler zu kompensieren, ist weiterhin die Stereokalibrierung und Rektifizierung durchzuführen, deren Ziel die zeilengenaue Parallelisierung der Bildebenen ist. Sind die Bildebenen zueinander ausgerichtet, kann für den entsprechenden Bildpunkt eine Raumkoordinate in Bezug auf das Koordinatensystem von Kamera 1 bestimmt werden. Diese Raumkoordinate für einen Objektpunkt P_{Objekt} muss noch an den Roboter weitergegeben werden. Dafür wird eine Transformation der Koordinatensysteme mit der Transformationsmatrix T durchgeführt (Gleichung 14).

$$\mathbf{P}_{\text{Objekt}}^{\text{Roboter}} = \begin{pmatrix} p_x^{\text{Kamera}} \\ p_y^{\text{Kamera}} \\ p_z^{\text{Kamera}} \end{pmatrix} * \mathbf{T}_{\text{Roboter}}^{\text{Kamera}} \quad (14)$$

Die roboterinterne Transformation der Koordinaten zwischen Roboter-Basiskoordinatensystem und Werkzeugkoordinatensystem erfolgt durch steuerunginterne Kinematikberechnungen und soll hier nicht näher betrachtet werden. Bei der empirischen Bestimmung dieser Transformationskette wird auch von *Hand-Auge-Kalibrierung* gesprochen (vgl. [253]). In Abbildung 4.19 sind die Beziehungen der Koordinatensysteme der Kamera, des Roboters und der Objektbasis zueinander dargestellt.

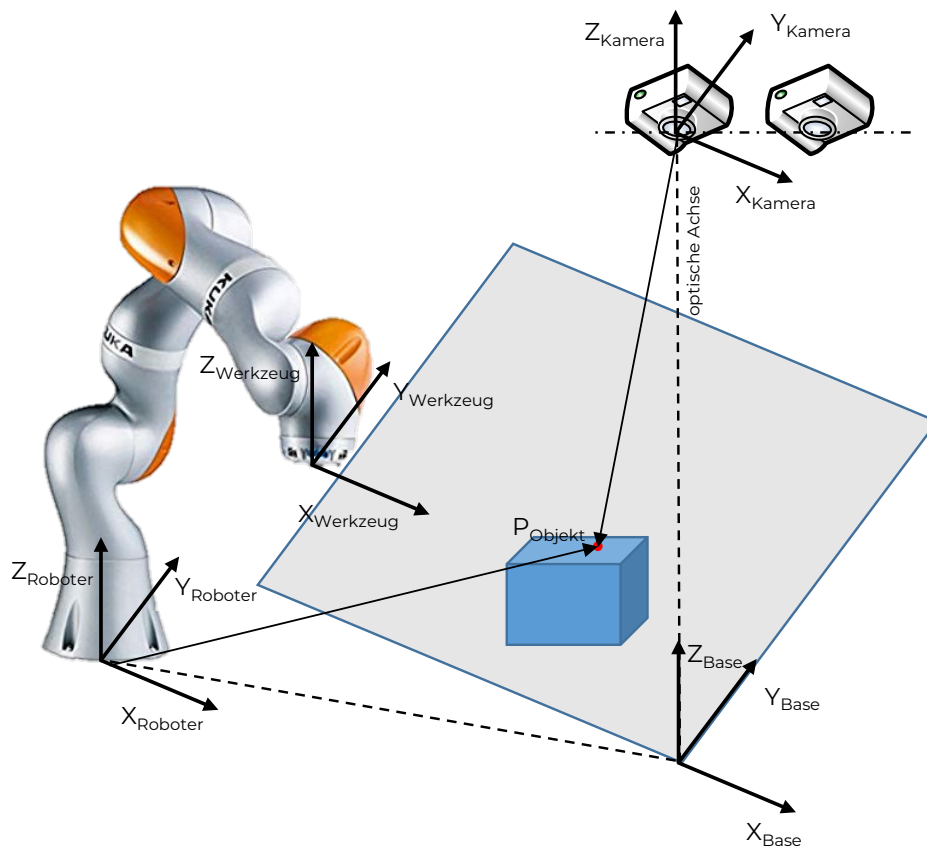


Abbildung 4.19: Koordinatensysteme des Demontagesystems in Relation zur SPU

Im Fall der SPU wird als Bildpunkt jeweils der Mittelpunkt der Bounding-Box als Koordinate verwendet. Gerade in Bezug auf bestimmte Anforderungen der Handhabung einzelner Komponenten kann es sinnvoll sein, von diesem Verfahren abzuweichen und feste Griffflächen oder Ansatzpunkte für die Werkzeugeinheit der DEU zu definieren. Eine Erweiterung im Rahmen einer Rückkoppelung der realen Positionsdaten aus der tatsächlichen Position der taktil validierten Aktionen (z. B. Antastvorgang) der DEU kann helfen, umgebungsbedingte Fehler systematisch zu kompensieren.

Bewertung

Da die Demontage oft der erste Schritt in der Behandlungskette von EoL-Komponenten ist, kann hier auch erstmalig eine direkte (optische) Analyse der Bauteilqualität durchgeführt werden. Dieser Schritt hat für den Gesamtprozess zwei Vorteile: Zum einen werden die Ergebnisse der Befundung bei der Entscheidung zur Demontagetiefe und der Verwertungsart über den RCP berücksichtigt, zum anderen ist es möglich, die Informationen zur Beschaffenheit der Komponenten an die übergeordnete Datenbank zurückzuspielen und beispielsweise für die Simulation strategischer Entscheidungsmodelle zu verwenden. Die dritte Aufgabe der SPU ist daher die *Bewertung* der Bauteile. Hierfür sollen unterschiedliche Beschädigungsformen automatisiert analysiert und in einem punktebasierten, dimensionslosen Indexsystem bewertet werden. Diese Bewertung geht in das digitale Abbild des Bauteils ein und kann somit sowohl vom RCP als auch durch andere Stakeholder ausgelesen und genutzt werden.

Zu den optisch bewertbaren Merkmalen gehören vor allem die in Abbildung 4.20 aufgeführten Kategorien. Voraussetzung hierfür ist, dass die Identifikation und Detektion der Bauteile erfolgreich durchgeführt wurde. Es sind dann Vollständigkeitsprüfung, Lageerkennung, Form- und Konturprüfung, Maßhaltigkeitsprüfung und Oberflächeninspektion in Bezug auf mechanische und chemische Schäden und Beeinträchtigungen möglich und je nach Bauteilanforderungen angebracht [235].

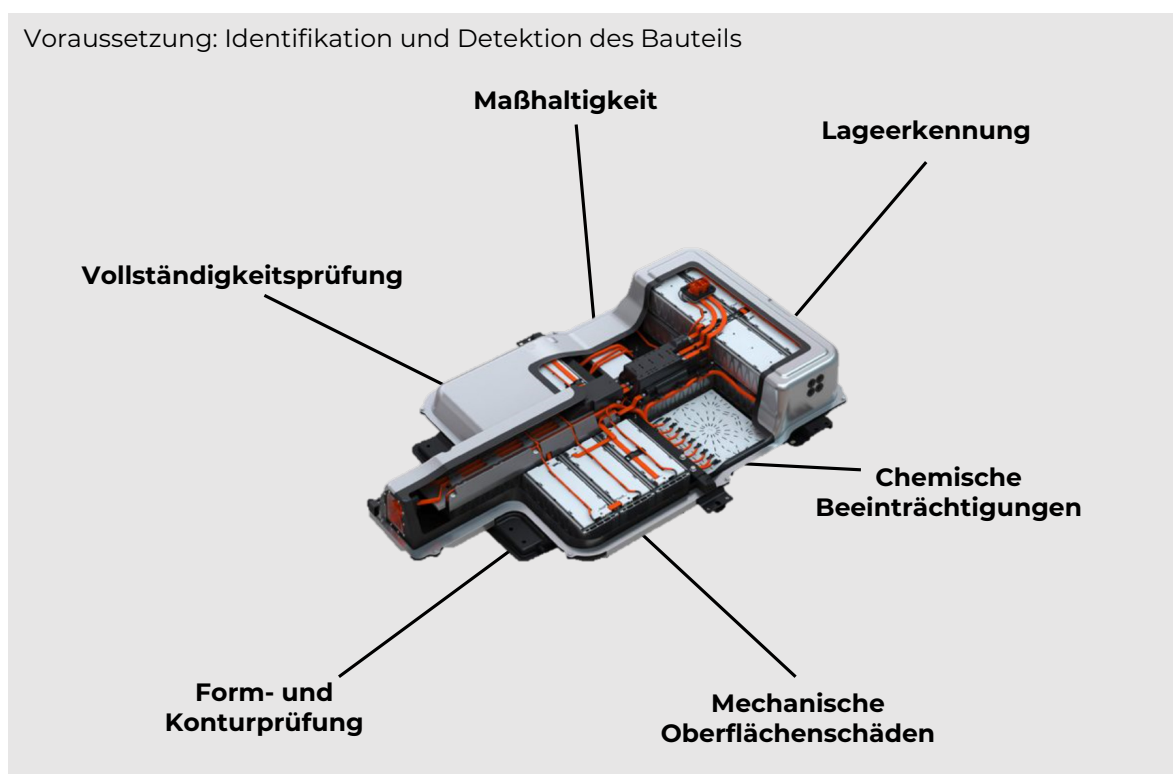


Abbildung 4.20: Kategorien der optischen Bauteilbewertung im Rahmen der SPU-Analyse

Bei der *Vollständigkeitsprüfung* wird ermittelt, ob alle Einzelteile einer Baugruppe vorhanden sind. Dies kann als Sonderfall des Identifikationsschrittes verstanden werden, da hierfür lediglich eine Abfrage zur Überprüfung der gefundenen Unterkomponenten für eine Baugruppe ausreichend ist. Abhängig vom Einsatzkontext kann eine Vollständigkeitsprüfung auch dazu dienen, sicherzustellen, dass beispielsweise Schutzvorrichtungen vor bestimmten Arbeitsschritten vorhanden sind. Die *Maßhaltigkeitsprüfung* ist eine quantitative Überprüfung der Objektdimensionen durch Messen. Ist das Kamerasystem hinreichend genau und sind die möglichen Abweichungen bekannt, können hierbei neben einer groben Prüfung der Maße auch Winkelabweichungen und Toleranzen in verschiedenen Bauteilbereichen geprüft werden [146]. Eine optische Messung im μm -Bereich erfordert allerdings spezielle Hardware, wie z. B. hochauflösende Laserscanner. Die *Lageerkennung* erfasst die Orientierung und die Position eines Bauteils und kann diese mit einem vorgegebenen Wertebereich im Raum abgleichen [254]. Im Rahmen der Detektion der identifizierten Bauteile wird bereits die Lage dokumentiert. Ist beispielsweise im Produktmodell der Positionsbereich einer Unterkomponente enthalten, kann so geprüft werden, ob sich das Bauteil an der richtigen Stelle befindet. Idealerweise erfolgt eine Lageprüfung anhand von drei unterschiedlichen charakteristischen Punkten, um Rotationsfehler ausschließen zu können. Die *Form- und Konturprüfung* ist eine qualitative Vorgehensweise zur Prüfung geometrischer Integrität. Durch den Abgleich von Bauteilkonturen mit einem Referenzpfad ist es z. B. möglich, ausgebrochene Stellen oder Dellen bzw. Beulen an Bauteilen festzustellen.

Die *Oberflächeninspektion* befasst sich mit mechanischen Schäden oder chemischen Beeinträchtigungen, wie beispielsweise Korrosion. Da die Anforderungen an diesen Prüfbereich stark schwanken können (zwischen einer qualitativen Befundung von Fehlerstellen bis hin zur exakten Bestimmung von Oberflächenkennzahlen), können hier unterschiedlich aufwendige Technologien bis hin zur mikroskopischen Erfassung der 3D-Mikrotopographie verwendet werden, die große Auswirkungen auf die Systemkosten haben [255]. Häufige Methoden zur einfachen Einordnung der Oberflächenqualität sind dagegen Farb- und Reflexionsverhalten, Materialspektroskopie und Detektion klassifizierter (mechanischer) Defekte [146].

Jedes dieser Bewertungsmerkmale kann auf unterschiedliche Weise, zum Teil auch mit verschiedenen Verfahren festgestellt werden. In Tabelle 4.10 findet sich daher eine Übersicht zu den gängigsten Detektionsmöglichkeiten der jeweiligen Kategorie.

Tabelle 4.10: Merkmale und Verfahren zur optischen Bauteilbewertung [146, 235, 256]

Merkmalsprüfung	Verfahren
Vollständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Segmentierung und Objektdetektion mit: <ul style="list-style-type: none"> ○ Binärsegmentierung (Grauwertbilder) ○ Konturverfolgung ○ Template-Matching (Überprüfung Korrelationskoeffizienten zwischen Bildausschnitt und Muster) ○ Neuronale Netze
Maßhaltigkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Stereometrie – Vergleichsmessung mit Referenzobjekten – Prüfung von Winkeln zwischen Hilfsgeraden
Lageerkennung	<ul style="list-style-type: none"> – Kantenantastung – Template-Matching – Segmentierungsmethoden (Multireferenzklassifizierung, NN)
Form- und Konturprüfung	<ul style="list-style-type: none"> – Konturverfolgung nach Farben

	<ul style="list-style-type: none"> – Binärsegmentierung (Grauwertbilder) – Filter und Background-Subtraction-Methoden
Oberflächeninspektion	<i>für mechanische und chemische Schadensbilder:</i> <ul style="list-style-type: none"> – Reflexionsverhalten – Mikroskopische Topographie – Segmentierungsmethoden – Farbabgleich

Ein aufgrund der Konzeption der SPU besonders naheliegendes Verfahren ist die Detektion von Bauteilfehlern mittels Segmentierung durch Klassifizierung als Feature im neuronalen Netz. Diese Vorgehensweise ermöglicht darüber hinaus die Schritte der Identifikation und Detektion mit der Bewertung zu kombinieren, wie beispielsweise durch die Implementierung einer Klasse zur Feststellung von Korrosion (vgl. [257, 258]). Ob hierbei ein Bauteil von einem Schadensbild betroffen ist, kann anhand eines Abgleichs der betroffenen Bildregionen bestimmt werden. Sobald der Bildbereich eines bekannten Objektes mit dem Detektionsergebnis des Schadensbildes zu einem festgelegten Prozentsatz übereinstimmt, kann davon ausgegangen werden, dass das Bauteil betroffen ist. Im Rahmen der prototypischen Umsetzung der Korrosionserkennung als Klasse im Identifikations-CNN konnte ein Wert von 40% Überlappung der Bounding-Boxes für kleine Objekte wie Schrauben als verlässlicher Parameter bestimmt werden (vgl. Kapitel 4.5). Dieser Schwellenwert ist hoch genug um falsche Positive durch minimale Roststellen oder Fehldetektionen zu vermeiden und gleichzeitig bei wahren Positiven ein verlässliches Ergebnis sicherstellen zu können. Die Konfiguration der SPU und die Prüfung unterschiedlicher Merkmale ist letztlich von der konkreten Situation und Bauteilgruppe abhängig und kann anwendungsbezogen um weitere Verfahren der optischen Sichtprüfung erweitert werden.

Ein Nachteil der Vorgehensweise über die Klassifizierung durch DL ist, dass auch hier eine große Menge an Trainingsdaten für jede Klasse erforderlich ist. Bei einigen Schadensbildern sind Alternativen, beispielsweise bei Korrosion über bestimmte Farbspektren möglich. Im direkten Vergleich zeigt sich jedoch, dass solche Methoden schlechtere Ergebnisse in Bezug auf die Genauigkeit der Anwendung in einer Größenordnung von etwa 20% im Vergleich zu DL liefern [259]. Da für einige Schadensbilder Open-Source Trainingsdaten (z. B. für die Klasse der Oberflächenkorrosion) vorliegen, soll für die SPU nach Möglichkeit auf DL-Features für die Erkennung von Schadensbildern gesetzt werden.

In der SPU erfolgt die optische Bewertung nach der Identifikation und Detektion der Bauteile. Ein allgemeiner Prozess zur Feststellung optischer Mängel setzt für eine Klassifizierung im CNN parallel zu diesen Schritten an. Wie in Abbildung 4.21 dargestellt, werden nach der Identifikation und Detektion des Bauteils im Bildbereich die jeweiligen Detektionsalgorithmen für Bauteilfehler angewendet. Alle Merkmale, die mit einer Klasse im CNN abgebildet werden können, sollen auf diese Weise umgesetzt werden. Für alternative Methoden gemäß der Tabelle 4.10 müssen die Bildbereiche der betreffenden Komponente ebenfalls über die Schritte der Identifikation und Detektion bestimmt werden. Sobald die Ergebnisse der Prüfung auf jede Schadensklasse vorliegen, erfolgt die Bildung eines Bewertungsindex, der an das Informationsmodell des Bauteils angehängt wird. Diese Information wird in den Teilprozessen des RCP genutzt und für externe Informationsprozesse über den Informationsmarktplatz weitergegeben.

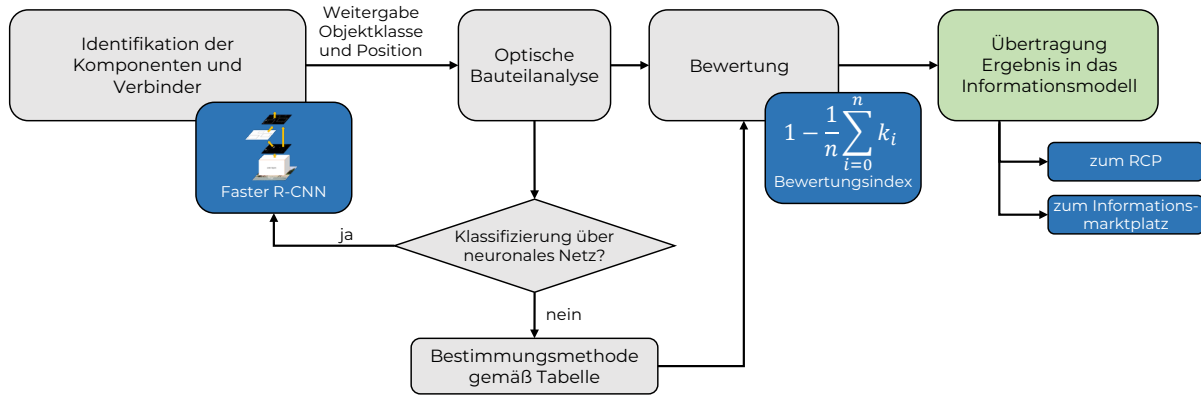


Abbildung 4.21: Ablauf der optischen Bauteilbewertung in der SPU

Um die optische Bauteilbewertung in einer vergleichbaren Größe für den Entscheidungsprozess des RCP sowie die weitere Verwendung im Informationsmodell quantifizierbar zu machen, ist es erforderlich auf Grundlage der Bewertungsergebnisse einen Index zu bilden. Für jede Fehlerkategorie k soll daher je nach Vorhandensein der Wert 0 (nicht vorhanden) oder 1 (vorhanden) geschrieben werden (Binärklassifizierung). Die Summe der geprüften Fehlerkategorien für ein Bauteil sei n , somit kann ein relativer Index Q_{OPT} wie folgt bestimmt werden (Gleichung 15):

$$Q_{OPT} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n k_i \quad (15)$$

Werden beispielsweise fünf optische Fehlermerkmale geprüft und drei erkannt ergibt dies einen relativen optischen Qualitätsindex von 40%. Dieser Qualitätsindex ist keine absolute Größe und kann daher eine ausführliche Befundung durch Prozesse der Qualitätssicherung nicht ersetzen. Der Index liefert vielmehr einen vergleichbaren Indikator für eine Ersteinschätzung des optischen Zustandes und damit eine wichtige Eingangsgröße für den RCP. Der Index Q_{OPT} wird nach seiner Ermittlung an das Informationsmodell der jeweiligen Komponente angefügt.

Die praktische Umsetzung der Bauteilbewertung im Rahmen der SPU hängt sehr von dem zur Verfügung stehenden Kamerasystem ab. Eine industrielle Bildverarbeitungsanlage, die in der Lage ist anspruchsvolle Oberflächenprüfungen bei individuellen Bauteilen durchzuführen, kann sechstellige Beträge an Hardware- und Implementierungskosten verursachen [254]. Die Implementierung des Prototypen in dieser Forschungsarbeit soll sich daher auf die beschriebene Methodik anhand ausgewählter Beispiele für eine CNN-Klassifizierung (siehe Kapitel 4.5) beschränken.

Arbeitsraumüberwachung

Die Überwachung des Arbeitsraumes durch die Kamerasensoren der SPU erfüllt zwei wichtige Teilaufgaben in der hybriden Demontage. Zum einen kann durch eine Auswertung der Veränderungen in Bezug auf Bauteilpositionen ein Rückschluss auf den aktuellen Fortschritt (Engl. *Execution Monitoring*) der Demontage gezogen werden, zum anderen ist es möglich, den Arbeitsraum des Roboters im Rahmen der MRK zu überwachen, um Kollisionen mit menschlichen Arbeitskräften bei einer Kooperation zu verhindern und so dazu beizutragen die *Sicherheitsanforderungen* nach der ISO/TS 15066 [260] zu erfüllen. Beide Aufgaben sind technisch ähnlich, da es bei der Arbeitsraumüberwachung immer um die *Verfolgung* spezifischer Objekte oder Personen geht.

Für die **Fortschrittsüberwachung** ist es erforderlich, zum einen das Vorhandensein der Hauptkomponenten im Bildbereich zu überwachen und zum anderen Verbinder zu erkennen und festzustellen, ob

alle erforderlichen Verbinder zur Entnahme einer Hauptkomponente entfernt wurden sind. Die Identifikation und Detektion der Objekte erfolgt dabei über die in den Abschnitten zur jeweiligen SPU-Aufgabe beschriebenen Methoden. Da der aktuelle Demontagefortschritt in erster Linie für die DEU und den RCP wichtig ist, um die weitere Vorgehensweise und Sequenz zu planen, werden die durch die SPU erkannten Veränderungen in einem gemeinsamen Datensatz mit dem RCP verarbeitet. Auf diese Weise ist es möglich, dass der RCP immer auf den tatsächlichen Demontagezustand zugreifen kann.

Eine Zustandsveränderung der Demontageszene sei daher definiert als die Veränderung der räumlichen Lage einer detektierten Komponente oder eines Verbinders zum Zeitpunkt t_1 gegenüber einem Zeitpunkt t_0 . Die Feststellung der Zustandsveränderung soll immer relativ zum Detektionsergebnis der Ausgangslage erfolgen, um das Risiko durch fehlerhaft erkannte Objekte zu minimieren. Sind teilweise-zerstörende oder zerstörende Demontagevorgänge vorgesehen, kann darüber hinaus die Veränderung des Volumens einer Hauptkomponente festgestellt werden, beispielsweise durch spanende Trennverfahren (z. B. bei [75] auf Basis einer 2,5 D Kameraeinheit). Hierfür sind jedoch andere Bildverarbeitungsverfahren oder dedizierte Klassen für das CNN erforderlich. Bei der Arbeit mit CNN-Algorithmen zur Objektdetektion besteht weiterhin die Möglichkeit einer semantisch zugeordneten *Instance Segmentation* [261]. Hierbei werden alle zu einem Objekt gehörigen Bildpunkte markiert, sodass im Gegensatz zu einer Bounding-Box auch Informationen zu Kontur und räumlicher Repräsentation gewonnen werden können. Dies bringt vor allem bei der Genauigkeit der Tiefendaten für spezifische Objektteile (beispielsweise nötige Greifflächen) erhebliche Vorteile, da eine Bounding Box immer einen Wert in einer Ebene zurückgibt und nicht berücksichtigt, dass Objekte abweichende Höhenprofile aufweisen können.

Die Änderung eines Zustandswechsels kann somit als Veränderung in der Ergebnisliste gegenüber t_0 quantifiziert werden. Ein Bauteil oder Verbinder gilt als entfernt, wenn es nach einer messbaren Bewegung den Bildbereich dauerhaft verlässt. Der Sonderfall eines verdeckten Bildbereiches wird durch die Pixelveränderungen des Störobjektes detektiert und führt zu einer transienten Zustandsinformation, die unter Prämisse der CWA nach einem erneuten Sichtbarwerden des Bildbereiches gelöst werden kann. Diese Betrachtung ist Teil der Auswertung über den Demontageerfolg im RCP und bezieht sich immer auf das Zielbauteil des jeweiligen Sequenzbausteins. Wird ein anderes Teil entfernt, kann so eine Mitteilung an den Anwender erfolgen, dass eine Fehl Ausführung vorliegt. Diese Folgerungen sind in Abschnitt 4.3.1 ausformuliert. Eine weitere Möglichkeit ist die ausschließliche Betrachtung der Szene jeweils vor und nach der Ausführung einer Aktion [262]. Hierbei wird der eigentliche Übergang bewusst nicht betrachtet und nur die Vorbedingung mit dem Ergebnis verglichen. Wichtig ist in jedem Fall eine Rückspiegelung der Zielobjekte zwischen RCP und SPU, um die Aussagen aus der optischen Prüfung als Attribut zielgenau zuzuschreiben. Die Interpretation der semantischen Beziehungen bleibt Aufgabe des RCP.

Bei einem fehlerfreien, absolut eigenständigen *Online-Execution-Monitoring* mit einem nicht-ortsfesten Roboter handelt es sich um eine extrem komplexe technische Anforderung, die bislang nur mit großem Ressourceneinsatz für Laborszenarien umsetzbar ist (vgl. [263]). Im Rahmen der SPU-Fortschrittsüberwachung geht es daher darum, ein unterstützendes Werkzeug bereitzustellen, welches gemeinsam mit den Mitarbeitenden die Ausführung der Demontage sicherstellt. In Bezug auf die Evaluation dieser Funktion wird ein Anwendungsszenario in Abschnitt 5 vorgestellt. Die Einschränkungen des beschriebenen Szenarios spiegeln dabei die in der Demontagepraxis üblichen Gegebenheiten wieder (z. B. ortsfester Roboter, bekannter Demontagebereich).

Bei der **Sicherheitsüberwachung** ist es notwendig, Menschen im Arbeitsbereich des Roboters zu erkennen und abhängig von dem erforderlichen Sicherheitskonzept aus der Risikobewertung nach DIN EN ISO 12100 [264] das Robotersystem entsprechend zu beeinflussen. Hierfür muss zum einen die Person im Bildbereich detektiert werden und es ist erforderlich, den kürzesten Abstand zu einem Körperteil der erkannten Person zu bestimmen. Da der Arbeitsraum der Demontagezelle dynamisch ist, muss anstelle eines Einzelbildes ein Videostream verwendet werden, um den Arbeitsbereich zu überwachen und die erkannten Personen darin zu *tracken* (d. h. ihre Bewegung zu verfolgen).

Die Detektion der Menschen erfolgt dabei ebenfalls mittels eines *Faster R-CNN* Modells analog der Identifikationsfunktion der SPU. Die technischen Aspekte zur Detektion der relevanten Punkte und Transformation auf das Roboterkoordinatensystem sind damit identisch zu den oben genannten Vorgehensweisen. Eine Besonderheit, die bei der Erkennung von Menschen im Gegensatz zu den Objekten des Demontagebauteils auftritt, ist die Tatsache, dass die zu detektierenden Personen keine kleinen Objekte im Sinne der Detektionsmethodik darstellen und somit deutlich bessere Ergebnisse in Bezug auf die Genauigkeit ermöglichen. Weiterhin sind Personen in vielen Anwendungsfällen der CNN-basierten Bilderkennung das Zielobjekt, weshalb es für den Trainingsprozess nicht erforderlich ist eigene Daten zu beschaffen, sondern auf fertig trainierte Modelle zurückgegriffen werden kann (z. B. das Detectron 2 Framework [265] oder OpenPose [266], die den Stand der Technik in der öffentlich verfügbaren Menschendetektion repräsentieren). Für bestimmte Anwendungsfälle zeigt sich jedoch, dass es in der Praxis hilfreich sein kann, in einem Transfer-Learning weitere Körperteile, wie z. B. Hände (vgl. Abbildung 4.22) explizit zu trainieren (vgl. [267]). Hierbei sollten auch typische Gegenstände wie Handwerkzeuge oder persönliche Schutzausrüstung (Handschuhe) in den Trainingsdaten berücksichtigt werden. Eine kombinierte Anwendung der Detektion von Körpern und zusätzlichen Merkmalen liefert dabei durchgängig bessere Ergebnisse als eine sequenzielle Verknüpfung bei einer geringeren verfügbaren Rechenleistung. Alternative Methoden zum Tracking menschlicher Arbeitskräfte, wie z. B. ein *Motion-Capturing* über spezielle Anzüge mit IMUs (Engl. *Inertial Measurement Units*, Trägheitssensoren) sollen hier aufgrund des deutlich höheren Aufwandes nicht näher betrachtet werden (vgl. [88]).

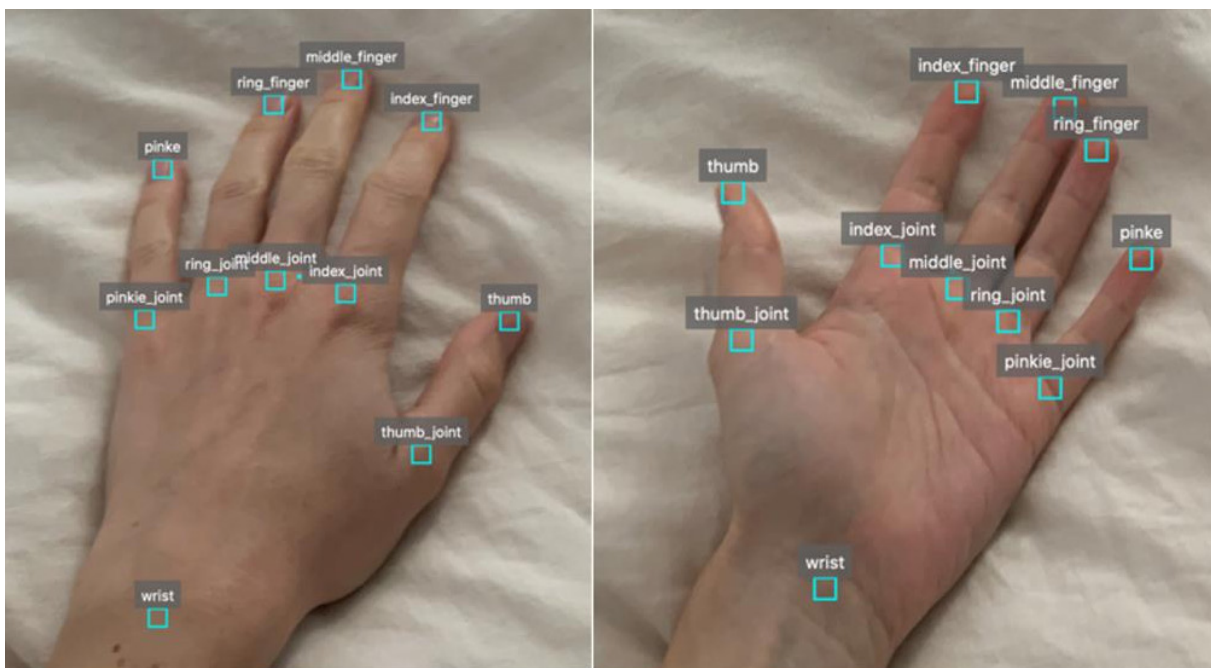


Abbildung 4.22: Zusätzliche Keypoint-Label für die verbesserte Erkennung von Händen im Arbeitsbereich (Beispiel)

Da eine Bounding-Box um das gesamte Objekt nicht ausreichend ist, um die sichere Bestimmung einer validen Abstandskoordinate durchzuführen, ist eine andere Form der Bildbereichssegmentierung erforderlich. Neben einer vollständigen *Instance Segmentation* (z. B. durch Bounding-Box Regression [268]), bei der die gesamten zu einem Objekt gehörigen Pixel markiert werden, ist vor allem die Vorgehensweise der *Keypoint-Detection* eine sinnvolle Methodik, um relevante Punktkoordinaten für gesuchte Schlüsselpunkte des Körpers zu detektieren [269]. Werden diese semantischen *Keypoints* für den menschlichen Körper (Gelenke, wichtige Punkte wie z. B. Ohren und Nase) verbunden, spricht man auch von *Skeleton-Tracking*. Mit modernen Keypoint-Detection Methoden sind bereits durchschnittliche Genauigkeiten (mAP) auf das COCO oder MPII-Datenset über 75% möglich [266, 270].

Für die sichere Ausführung der Arbeitsraumüberwachung kann neben einer allgemeinen Szenenüberwachung auch eine Kamera am Roboterflansch montiert werden. Da das Werkzeug die am stärksten gefährdete Stelle des Roboters darstellt, ist es sinnvoll die Koordinatentransformation des Hindernisses auf diesen Punkt zu beziehen. Um die dichteste Koordinate an die Sicherheitssteuerung der DEU zu übertragen ist es daher erforderlich, dass sich der detektierte Objektpunkt nicht auf den Kameranullpunkt, sondern auf den Endeffektor des Roboters (*Tool Center Point, TCP*) bezieht. Da im Rahmen der unterschiedlichen Demontageanforderungen verschiedene Werkzeuge verwendet werden, ist es notwendig für jedes Werkzeug eine individuelle Distanz zwischen TCP und Kameranullpunkt in der Arbeitsraumüberwachung zu hinterlegen. Diese Distanz muss vor der Übergabe zur Sicherheitssteuerung vom ermittelten Wert abgezogen werden (da die Flanschkamera i. d. R. weiter vom Roboter entfernt ist als der TCP). Die Distanz s_{Tool} wird trigonometrisch wie in Gleichung 16 dargestellt bestimmt:

$$s_{Tool} = \sqrt{(x_{TCP} - x_{Objekt})^2 + (y_{TCP} - y_{Objekt})^2 + (z_{TCP} - z_{Objekt})^2} \quad (16)$$

Der so bestimmte Distanzwert für den nächsten Keypoint der erkannten Person wird an die DEU weitergegeben. Sonderfälle wie beispielsweise das Verlassen des Bildbereiches können entweder durch eine Erweiterung in einem Multi-Kamera System oder durch die Prognose von Bewegungsbahnen auf Basis der Detektionsdaten (Tracking der Bewegungsvektoren) in einer Online-Simulation kompensiert werden, was jeweils in dem Reaktionsalgorithmus der Sicherheitssteuerung zu berücksichtigen ist. Eine wichtige Aussage für den Einsatz der Arbeitsraumüberwachung als Teil der Sicherheitsvorkehrungen im industriellen Anwendungsbereich ist darüber hinaus durch die Zertifizierung der Sicherheitssysteme nach DIN EN ISO 13849 [271], den sog. *Performance-Leveln* für sicherheitsbezogene Steuerungen gegeben. Zurzeit gibt es fertige Kamerasysteme am Markt, die DIN EN ISO 13849 *Performance Level D* erfüllen. Für eine Eigenkonstruktion wären im Rahmen des industriellen Einsatzes entsprechende Zertifizierungen von Hard- und Software erforderlich.

Zusammenfassend erfüllt die SPU damit die Anforderungen hinsichtlich Identifikation, Detektion, Bewertung und Arbeitsraumüberwachung für eine dynamische Demontageumgebung. Die Datenübertragung der SPU an die anderen Module erfolgt über die in Abschnitt 4.4 beschriebenen Protokolle und Schnittstellen. Durch ihren Status als Wahrnehmungseinheit ist die SPU die wichtigste Quelle neuer Informationen in der Demontageautomatisierung und generiert einen informationsspezifischen Mehrwert auch über den reinen Demontageprozess hinaus. Die direkte Verbindung mit RCP und DEU erlaubt die Synthese der sensorischen Informationen als Entscheidungsgrundlage sowie die Möglichkeit eines optischen Feedbacks zum aktuellen Demontagestatus. Die Sicherheitsüberwachung ermöglicht die Realisierung einer Schutzsteuerung über die DEU, um effiziente MRK-Prozesse zu etablieren.

4.3.3 Die Disassembly Execution Unit

Die *Disassembly Execution Unit* (DEU) ist als ausführende Systemkomponente für die eigentliche Demontage zuständig. Der initiale Demontagebefehl wird gemäß des Prozesskonzepts für die hybride, selektive Demontage aus Abbildung 4.5 über das *Human-Machine-Interface* (HMI) der DEU an das Demontagesystem weitergegeben. Nach der informationsbasierten Verarbeitung über RCP und SPU wird für die Plansequenz das Werkzeugsystem konfiguriert und im Rahmen der Operationsplanung die Handlungsfolge des Roboters und des Menschen als MRK-Prozess geplant. Dieser Funktionsschritt erfolgt im Austausch zwischen den Bestandteilen der DEU und dem RCP als der Master-Steuerungseinheit. Um die *States* der RCP-Sequenz zu erreichen, ist die Koordination von physischen Demontageschritten in den *Sub-States* eine wichtige Teilaufgabe der DEU. Ist der Operationsablauf und die Werkzeugkonfiguration bestimmt, muss das Robotersystem noch die Pfadplanung für den Ausführungsprozess durchführen. Die Aufteilung der Arbeitsschritte zwischen Mensch und Maschine ist ebenfalls Teil der Operationsplanung. Da es sich bei diesem Ausführungsprozess um einen kollaborativen Aufbau handelt, ist es erforderlich, dass die entsprechenden Sicherheitsbestimmungen für das Robotersystem, auch unter Berücksichtigung der Informationen aus der Arbeitsraumüberwachung der SPU erfüllt werden. Auch der Aufbau der DEU erfolgt immer aus dem Blick des Informationssystems heraus. Es sollen dabei keine technischen Einzellösungen entwickelt werden, vielmehr geht es um ein – ähnlich eines Baukastensystems – übertragbares Konzept, das hardwareunabhängig in zahlreichen Einsatzkonfigurationen implementiert werden kann.

Die Hauptfunktionen sind somit:

- das **Robotersystem**,
- das **Werkzeugsystem** und
- das **Human-Machine-Interface** (HMI).

Tabelle 4.11 stellt die Struktur der DEU nach der PEAS-Methodik dar. Die Wirksamkeit der DEU ist unmittelbar durch den Erfolg der Demontageoperation auswertbar, welcher direkt messbar ist (in Form vom empirisch-relationalen Demontageerfolg und der benötigten Zeit). Das Demontageobjekt, der Roboter und die benötigten Werkzeuge sowie die an der MRK-Arbeitsfolge beteiligten Mitarbeitenden sind die von der DEU beschriebene Umgebung. Bis auf das Demontageobjekt sind Roboter, Werkzeug und Mensch gleichzeitig auch die Akteure der Systemkomponenten, die die Demontage ausführen. Neben der umfangreichen menschlichen Wahrnehmung (die aufgrund der MRK-Konzeption ebenfalls der DEU zuzurechnen ist), stellt Sensorik an Roboter und Werkzeugen zur Bestimmung der korrekten Ausführung der automatisierten Demontageschritte eine wichtige Komponente des Systems dar. Das HMI erfasst darüber hinaus als sensornahes System die Befehle der Mitarbeitenden und übersetzt diese in eine für die Komponenten und das Informationsmodell zu verarbeitende Form.

Tabelle 4.11: PEAS-Beschreibung der DEU

Agent	Performance Measure	Environment	Actuators	Sensors
Disassembly Execution Unit (DEU)	Demontageerfolg Demontagezeit Sicherheit	Demontageobjekt Robotersystem Werkzeugsystem Mensch	Roboter Werkzeug Mensch	Kraft-Momenten Sensorik an Roboter und Werkzeug HMI Menschliche Wahrnehmung

Robotersystem

Das Robotersystem ist für die physische Ausführung der Demontageplanung des RCP im Rahmen einer MRK-Anwendung verantwortlich, da nicht alle erforderlichen Operationen in jedem System vollautomatisiert ausgeführt werden können. Das Ergebnis der Demontageplanung aus dem RCP, die Sequenz, muss dafür zunächst im Rahmen der *Operationsplanung* in ausführbare Teilschritte (Operationen) zerlegt werden, für die sowohl die zu nutzenden Werkzeuge, als auch die Aufteilung zwischen Mensch und Roboter definiert werden müssen. Eine weitere Funktion (siehe Tabelle 4.12) ist die roboterspezifische *Pfadplanung* zur Ausführung der Operation unter Berücksichtigung der relevanten Randbedingungen. Eine Besonderheit hierbei ist, dass die Umwelt des DEU eine dynamisch veränderliche Umgebung darstellt und daher nicht mit einer situationsunabhängigen Offline-Programmierung starre Befehle implementiert werden können. Es ist deshalb erforderlich, eine modulare Befehlsstruktur zu definieren, die sich auf die veränderlichen Randbedingungen konfigurieren lässt. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist überdies die Möglichkeit valide Operationen in einem standardisierten Datenmodell zu speichern, um diese dann, vergleichbar zu den Produktdaten, als *Prozessdatenmodell* in einer externen Datenbasis auch für andere Stakeholder in der Kreislaufwirtschaft zugänglich zu machen (Kommunikationsfunktion). Die *Ausführungsüberwachung* der Operationen ist dabei eng mit dem State Transition Manager des RCP verknüpft, an welchen über den Strukturtyp *DisassemblyResult* der Demontageerfolg für einen Sequenzschritt zurückgegeben wird. Ein weiteres Element, das stark von den äußeren Bedingungen der Demontageumgebung abhängig ist, ist die Sicherheitskonfiguration bzw. Schutzsteuerung des Roboter- und Werkzeugsystems für die MRK-Anwendung auf Basis der Sicherheitsüberwachung der SPU. Hierbei muss festgelegt werden, wie sich das Robotersystem bei Eintritt des Menschen in verschiedene Arbeitsbereiche des Roboters verhält. Die *Werkzeugkonfiguration* bzw. das Werkzeugsystem werden in diesem Konzeptentwurf hinsichtlich möglicher Demontageverfahren analysiert und es wird eine Vorgehensweise definiert, mit der eine modulare Konfiguration des Systems basierend auf den Produkteigenschaften und den Prozesserfordernissen ausgeführt werden kann. Da die benötigten Werkzeuge stark von dem tatsächlichen Produkt abhängig sind, wird auf der Konzeptebene kein eigenes Werkzeugsystem entwickelt. In Kapitel 4.5 wird das Werkzeugmanagement exemplarisch für Schraubfälle umgesetzt.

Durch diese Funktionalitäten des Robotersystems kann das Modul im Rahmen des DEU-Agenten sowohl der Koordinationsebene als auch der Ausführungsebene nach [138] (vgl. Kapitel 2.4) zugerechnet werden.

Tabelle 4.12: Funktionsübersicht zum Robotersystem-Modul der DEU

Funktion	Input	aus Quelle	Output	an Senke
Operationsplanung	Sequenz	RCP	Operationen	Roboter Werkzeug HMI
Pfadplanung	Operation, Werkzeug, Hardware, Umgebung	Operationsplanung SPU	Roboterbewegung	Roboterarm
Werkzeugkonfiguration	Operation	Operationsplanung	Werkzeugauswahl	Werkzeugsystem
Ausführungsüberwachung	Operation Bewegung Umgebung	Operationsplanung Pfadplanung SPU	Status Demontageerfolg	RCP, Informationsmodell
Kommunikation	Operationen	Operationsplanung	Datensatz	Informationssystem

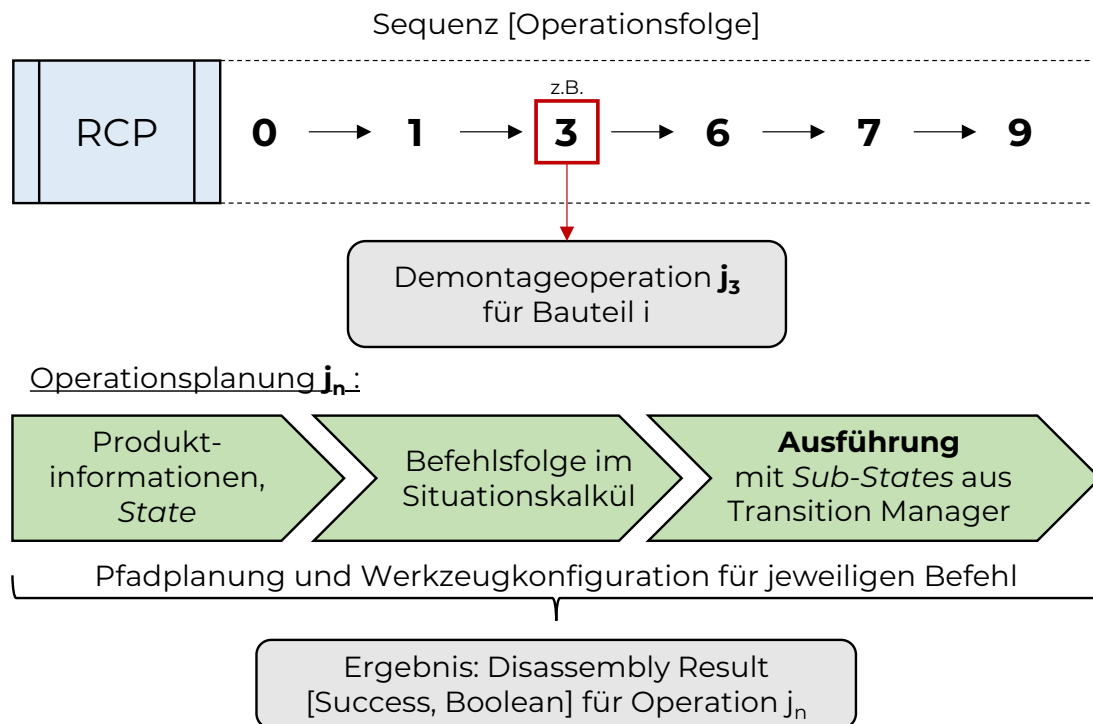


Abbildung 4.23: Exemplarischer Prozessablauf der Operationsplanung in der DEU

Die Operationsplanung beschreibt wie in Abbildung 4.23 dargestellt den Prozess der Detailplanung der einzelnen Operationen einer Sequenz aus dem RCP. Es ist daher zwingend zwischen den Begriffen der *Operation* im globalen Sinne der Sequenzplanung und den *physischen Operationen* des Robotersystems bei der Ausführung der globalen Sequenzabläufe zu differenzieren. Eine weitere wichtige Unterscheidung sind die jeweiligen *States* einer Demontagesequenz, die die Komponenten eines Produktes in Abhängigkeit des jeweiligen Sequenzschrittes abbilden und den *Sub-States*, die die ausgeführten *Aktionen* zwischen den States beschreiben und damit Gegenstand der Operationsplanung sind. Der DEU-Agent muss für jeden Zeitpunkt der Wahrnehmung eine Handlungsmaxime bestimmen können, die dem Erfolgskriterium zuträglich ist [139], d. h. aus den Schritten der Sequenz erfolgt eine Zielbeschreibung für jede Aktion zwischen den einzelnen Sub-States. Die Pfadplanung und die Werkzeugkonfiguration sind abhängig von diesen Aktionen.

Um diesen Prozessablauf exemplarisch anhand eines Bauteils zu erläutern, soll im Folgenden die Demontage einer Komponente in der Operationsplanung vollständig dargestellt werden. Diese Ausführungsplanung fasst somit *eine* Operation aus der Sequenz mit all ihren Aktionen detailliert zusammen. Ausgangslage bildet der initiale Sub-State der Operation, der gleich dem Ausgangs-State des Sequenzschrittes sei. Als Ausgangssituation soll das Produkt aus Abbildung 2.9 betrachtet werden und der auszuführende Sequenzschritt ist die Demontage des Bauteils **C**. Hierbei kann aufgrund der zwei unterschiedlichen Verbinder eine Aktionsfolge definiert werden, die alle grundsätzlichen Abfragen und Befehlsmodule der Operationsplanung des Robotersystems enthält.

In Bezug auf die konkreten Roboteranforderungen kann es einen Unterschied bei den physischen Operationen machen, in welcher Reihenfolge eine Sequenz aufgebaut ist (z. B. bei den Trennoperationen). Darüber hinaus ist es wichtig, dass in der Implementierung die Konfiguration des Gesamtsystems die individuelle Ausführungsplanung bestimmt (Anzahl und Art der Roboter, verfügbare Werkzeuge etc.).

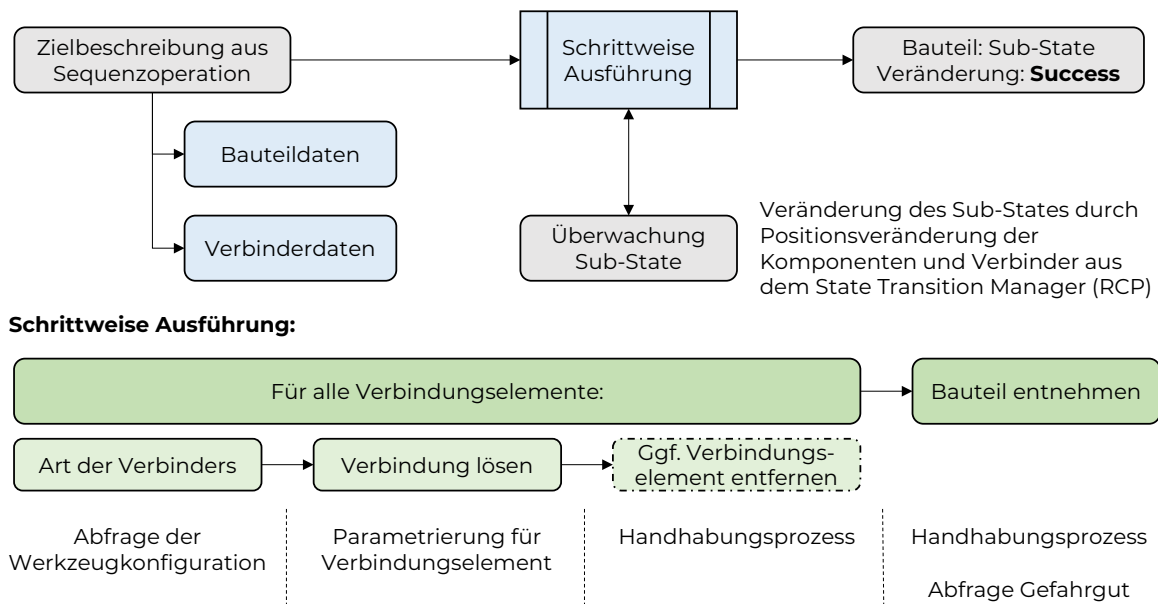


Abbildung 4.24: Ablaufroutine der Ausführungsplanung für das Robotersystem

Wie in Abbildung 4.24 dargestellt, ist der erste Schritt der Ausführungsplanung die Bestimmung der Verbindungsarten, deren Anzahl und der daraus hervorgehenden Werkzeugkonfiguration für die Demontage. Auch hier ist es erforderlich, für den individuellen Implementierungsfall alle Verbindertypen des Produktes und die dafür notwendigen Werkzeuge zu kennen und bereitzuhalten. Bei der Priorisierung der verbinderbezogenen Aktionen soll entsprechend der Reihenfolge in der Liste der Verbindungselemente des Datenmodells vorgegangen werden, da die Vorrangrelationen bereits durch die Sequenzplanung in Bezug auf die Hauptkomponenten berücksichtigt werden. Ist für eine Verbindertyp kein Werkzeug vorhanden, wird die Aktion vom System als manueller Arbeitsschritt geplant. Die Möglichkeit von Multi-Robotersystemen in der Praxis wird in diesem Beispiel nicht betrachtet, da die regelbasierte Aufteilung von Aufgaben bereits zwischen Roboter und Mensch deutlich wird und mehrere Roboteragenten die Darstellung daher nur unnötig verkomplizieren. Ein Werkzeugwechselsystem soll für das vorgestellte Beispiel hingegen angenommen werden, um den Einsatz verschiedener Werkzeuge und Greifer zu ermöglichen.

Eine wichtige Prämisse bei der Operationsplanung ist die Annahme, dass Roboteraktionen aufgrund der schnelleren Ausführung und der besseren Wiederholgenauigkeit der menschlichen Aktion vorzuziehen sind, d. h. es wird immer erst die Möglichkeit der automatisierten Demontage geprüft, bevor als Alternative eine manuelle Demontage vorgeschlagen wird. Eine weitere grundlegende Fragestellung ist die Berücksichtigung von Gefahrstoffen (Engl. *hazardous materials*, kurz *Hazmat*) bei der Demontage. Da es hier eine große Vielfalt an möglichen Stoffen gibt, mit deren Umgang spezifische Vorschriften verbunden sind, soll diese hier lediglich erwähnt sein, jedoch in der weiteren Planung nicht mehr berücksichtigt werden. Die Implementierung eines Anlagenkonzeptes erfordert jedoch die Berücksichtigung der erforderlichen Verordnungen zum sachgemäßen Umgang (siehe dazu [272]).

Die Aktionen des Systems werden in der Folge in ihrer allgemeinen Form nach dem prädikatenlogischen Situationskalkül (vgl. [141] und [122]) dargestellt. Diese Form der Darstellung ist unabhängig vom eingesetzten System und das Funktionsprinzip in jede gängige Programmiersprache übertragbar. Probleme des allgemeinen Situationskalküls wie das Rahmenproblem (Engl. *frame problem*), das Qualifikationsproblem (Engl. *qualification problem*) und das Verzweigungsproblem (Engl. *ramification problem*)

werden durch Planungsprämissen und festgelegte Konventionen praktisch soweit gelöst, dass die Operationsplanung systemseitig durchführbar wird. Für das Rahmenproblem, welches die Problematik der Gültigkeit von bestehenden Formeln für Folgesituationen beschreibt, wird durch die kontinuierliche Auswertung der Demontageumgebung durch die SPU über alle planungsrelevanten Sub-States, d. h. prädikatenlogische Situationen, eine stets aktuelle Beschreibung der Rahmenbedingungen implizit gegeben. Es werden daher keine Rahmenaxiome definiert, da diese für die Demontageszene durch die Funktionen der SPU und die Informationen des Datenmodells keinen zusätzlich erschließbaren Informationsgewinn bedeutet. Veränderungen der Situationen werden nur durch *relationale Fluents* (siehe 2.4) beschrieben, die (Ausgangs-)Situationen werden durch die Informationen der SPU und das Datenmodell als hinreichend definiert angesehen. Jede Aktion ist ausführbar, wenn die *Effektaxiome* der korrespondierenden Ausführungsbedingungen einen positiven Wahrheitswert aufweisen. Das Qualifikationsproblem beschreibt die Problematik, die Vorbedingungen für eine Aktion in Bezug auf den Gesamtzustand vollständig anzugeben. Ähnlich wie beim Rahmenproblem kann auch hier durch das ganzheitliche Funktionsprinzip des Demontagekonzeptes eine praktische Vorgehensweise beschrieben werden, indem die Ausführungsbedingungen und parametrische Anforderungen der jeweiligen Aktionen in einer modularen Befehlsstruktur (spezifische Methoden mit Prüfvariablen) der Roboterprogrammierung berücksichtigt werden. Diese Abfragen, z. B. bezüglich der zulässigen Traglast, werden ebenfalls formuliert. Auch werden durch sensorische Rückmeldungen der SPU Revisionen in Bezug auf die aktuelle Situation ermöglicht, was quasi-nichtmonotone, d. h. veränderliche und an die äußeren Bedingungen angepasste Schlussfolgerungen zulässt, obwohl der eigentliche Kalkül nach einem unveränderten Prozess abläuft. Das Verzweigungsproblem, also das indirekte Betreffen anderer Objekte durch eine Aktion, wird durch die atomare Struktur der Sequenzplanung umgangen, da jede Operationsplanung sich jeweils nur mit der Demontage eines Bauteils befasst, welches nach Vorrangrelationen problemlos erreichbar ist.

In Abbildung 2.7 ist der Übergang von einem Ausgangszustand in einen Zielzustand für die Demontage von Bauteil *C* dargestellt. Die notwendigen Formeln für den Aktionsplan werden schrittweise erläutert. Alle auftretenden Variablen der folgenden Logikformeln und Axiome seien dabei implizit allquantifiziert. Grundlage zur Beschreibung der Weltzustände liefern vorab definierte Prädikate in Bezug auf Bauteile und Verbinder. Eine Differenzierung zwischen diesen Kategorien ist notwendig, um Befehle mit unterschiedlichen Aktionen für die jeweilige Kategorie zu realisieren. Allgemein seien die Komponenten mit der Variablen *X* und die Verbinder mit der Variablen *Y* beschrieben.

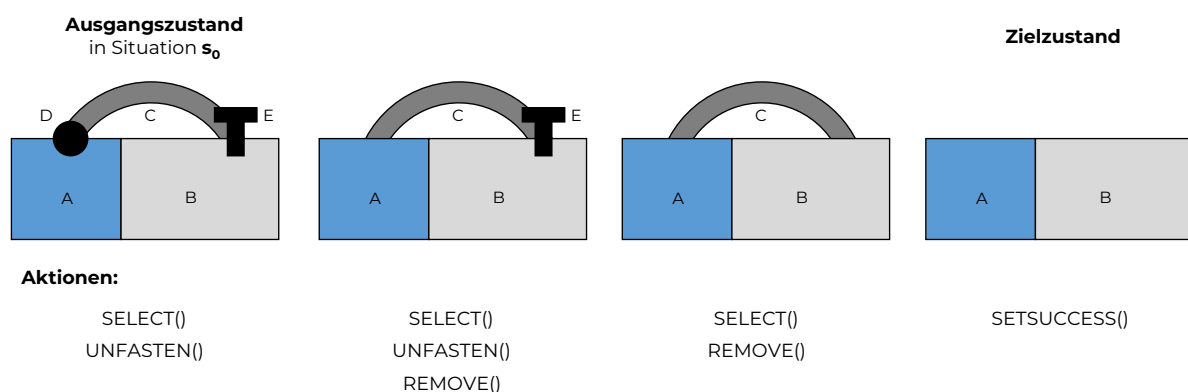


Abbildung 4.25: Zustände und Aktionen für das Operationsbeispiel der DEU

Es seien die folgenden Prädikate der Weltzustände definiert:

$CONNECTED(X, Y)$	Bauteil X Verbunden mit Verbinder Y
$INSCENE(X)$	Komponente befindet sich im Arbeitsraum
$OUTSCENE(X)$	Komponente befindet sich außerhalb des Arbeitsraums
$CLEAR(X)$	Element ist ohne Einschränkungen erreichbar

Im Ausgangszustand wird die initiale Situation (d. h. der betreffende operationelle Sub-State) s_0 für die betroffenen Bauteile und Verbinder der Operation auf Grundlage der Zustandsprädikate beschrieben:

$$s_0 \equiv CONNECTED(C, D) \wedge CONNECTED(C, E) \wedge CONNECTED(A, D) \wedge CONNECTED(B, D) \wedge \\ INSCENE(A, B, C, D, E) \wedge CLEAR(D, E)$$

Dieser Ausgangszustand basiert auf dem Informationsmodell und den Daten der SPU. Hieraus lassen sich bereits wichtige Informationen für die Abfrage der Möglichkeit bestimmter Aktionen schlussfolgern, so z. B. der Umstand, dass das Zielbauteil C in s_0 nicht uneingeschränkt erreichbar ist:

$$CONNECTED(C, D) \in s_0 \rightarrow \neg CLEAR(C, s_0)$$

Die Angabe der Situation innerhalb des Argumentes der Prädikate berücksichtigt dabei die Zeitkomponente in der Historie der ablaufenden Aktionen, die zu der jeweiligen Situation führt. Von der Ausgangssituation soll das System in einen Zielzustand überführt werden, in dem das Bauteil C aus der Produktgruppe demontiert wurde und damit die Operation erfolgreich beendet ist. Wenn dieser Zustand erreicht ist, dann wird die Variable *Success* des Objektes *DisassemblyResult* auf *true* gesetzt (hierfür kann im finalen Aktionsplan die Pseudo-Aktion¹⁹ $SETSUCCESS(i, j)$ für den Sequenzschritt verwendet werden). Diese Zielbeschreibung lässt sich als existentiell quantifizierte Konjunktion darstellen:

$$\exists s_t \mid [OUTSCENE(C, s_t) \wedge CLEAR(A, B, s_t)]$$

Aktionen führen im Situationskalkül zu neuen Situationen. Verschiedene *Aktionsfolgen* beschreiben deshalb verschiedene *Situationen*, die aber trotzdem den gleichen *Zustand* des Systems darstellen können. Dies betrifft vor allem Kommutationen im Operationsplan oder die Festlegung von Reihenfolgen bei der Demontage der Verbinder. Mögliche Aktionen der DEU, um die Situation des Gesamtsystems so zu beeinflussen, dass der Sub-State sich hin zu einem Zielzustand verändert seien:

$SELECT(Y, \omega)$	Auswahl des Werkzeugs ω in Abhängigkeit von Verbinder Y
$UNFASTEN(Y)$	Lösen/Entfernen von Verbindungselement Y
$REMOVE(X)$	Entfernen von Bauteil X (bringt X in <i>OUTSCENE</i>)

Um aus einer bestehenden Situation und einer Aktion heraus eine neue Situation zu beschreiben, wird die binäre Funktion $do[A, S]$ eingeführt. Diese bestätigt die Ausführung der Aktion A in der Situation S . Die Aktionen können für fortgeschrittene Situationen als verschachtelte Fluents angegeben werden. So kann das Prädikat $CLEAR$ für das Bauteil C wie folgt angegeben werden:

$$CLEAR(C, do[UNFASTEN(E, do[UNFASTEN(D, s_0)])])$$

¹⁹ Es handelt sich zwar um einen Handlungsbefehl der DEU, da er aber keine Auswirkung auf die Situation des physischen Demontageablaufs hat, stellt er keine Aktion im Sinne des Situationskalküls dar.

Dieser relationale Fluid kann einen positiven oder negativen Wahrheitswert haben. Um ein Bauteil zu demontieren, müssen auch die erforderlichen situativen Ausgangsbedingungen angegeben werden. Dies erfolgt als Konjunktion der Bedingungen:

$$Poss(REMOVE(X), S) \equiv INSCENE(X) \wedge CLEAR(X) \wedge \neg CONNECTED(Y)$$

Auf Grundlage dessen können *Effektaxiome* formuliert werden, die die Wirkung des Fluents auf Situationen durch die Ausführung der enthaltenen Aktion definieren:

$$Poss(REMOVE(X), S) \rightarrow OUTSCENE(X, do[(REMOVE(X), S)])$$

Diese Beschreibungen können grundsätzlich für alle Prädikate/Aktionen formuliert werden und beschreiben damit den Ablauf der logischen Programmierung zur Erreichung des Zielzustandes. Bei der Implementierung der DEU muss dieser Plan jeweils in Methoden der spezifischen Roboterprogrammierung umgesetzt werden. Eine vollständige Plangenerierung auf der Ebene des logischen Kalküls kann z. B. mittels SLD-Resolution erfolgen [141].

Ein wichtiger Schritt in der Operationsplanung ist die Auswahl des passenden Werkzeuges mit der Aktion $SELECT(Y, \omega)$, die nicht relational, sondern funktional ausgewählt werden muss, wobei die unterschiedlichen Werkzeuge jeweils durch Integer-Codierung beschrieben werden können. Die Abfrage des Werkzeuges kann dabei relevante Parameter (z. B. Schlüsselweite bei Schrauben, Gewichte oder Schnittbedingungen) abfragen und das Werkzeug entsprechend der benötigten Kriterien zur Verbinderdemontage auswählen. Ist bei der Abfrage kein Werkzeug im Rahmen der DEU-Module verfügbar, wird die Aktion planungsseitig als vom Menschen auszuführende Aktion definiert und muss manuell über das HMI angefordert und nach der Ausführung bestätigt werden. Dies entspricht einer synchronisierten Tätigkeit im gleichen Arbeitsraum im Rahmen der MRK. Für den Befehl der Aktion $UNFASTEN(Y)$ müssen bei der Roboterprogrammierung die erforderlichen Operationsparameter (z. B. Drehmomente, Länge der Schrauben, Schnitttiefe) aus einer Operationsdatenbank für das jeweilige Verbindungselement entnommen werden. Da es sich hierbei um wichtige Prozessdaten handelt, sollten diese ebenfalls in Form eines Informationselementes für den jeweiligen Verbindertypen im übergreifenden Datenmodell hinterlegt sein, können in der praktischen Ausführung aber auch auf der lokalen Steuerung dupliziert werden, um sich wiederholende Planungsabläufe in den Demontageoperationen zu beschleunigen.

Der Umgang mit beschädigten Verbindern und Bauteilen nimmt eine besondere Rolle in der Operationsplanung ein. Da es nicht möglich ist, über einen gewissen Grad beschädigte Verbinder automatisiert zu demontieren, ist der durch die SPU erfasste und im Informationsmodell dokumentierte Zustandswert Q_{OPT} abzufragen und bei Unterschreitung der technisch möglichen Grenze eine manuelle Demontage über eine Nachricht an das HMI einzuleiten. Da der erforderliche Wert nicht pauschal festgelegt werden kann, ist in diesem Bereich für die praktische Implementierung eine umfassende Untersuchung des Schadenverhaltens verschiedener Verbindungselemente und der Auswirkung auf deren Demontierbarkeit erforderlich, die jedoch nicht im Umfang dieser Arbeit betrachtet wurde.

Zur Ausführung der Aktionen, die eine Bewegung des Roboters erfordern, ist die *Pfadplanung* eine weitere Aufgabe der DEU. Nachdem das Zielobjekt und das Werkzeug für eine Aktion festgelegt wurden, ist es erforderlich, dass der Roboter die Ziel-Raumkoordinaten sicher anfährt. Im Bereich der Demontage kann es hierbei einige Besonderheiten geben, die bei der Pfadplanung zu berücksichtigen sind, aber größtenteils durch eine kontinuierliche Überwachung des Arbeitsraumes erfüllt werden können. Grundsätzlich soll für die Pfadplanung im Rahmen der DEU eine raumkoordinatenbezogene Inverskinematik verwendet werden (vgl. [273]), deren spezifische Implementierung ein Bestandteil der meisten

Robotersteuerungen ist. Die zur Verfügung stehenden Solver moderner Robotersteuerungen liefern dabei bessere Ergebnisse in Bezug auf Wiederholgenauigkeit und Bahntreue als Open-Source Modelle von Drittanbietern, z. B. das Planungsmodul *Move-It!* Im ROS-Framework.

Bei der Pfadplanung für die *REMOVE()*-Aktion ist die Kollisionsvermeidung des Bauteils mit angrenzenden Produktkonturen eine wichtige Planungsaufgabe. Hierfür können unterschiedliche Ansätze gewählt werden. So ist eine klassische Methodik, die auch zur Generierung möglicher Sequenzen (falls keine Vorrangrelationen bekannt sind) genutzt werden kann, ein RRT-Algorithmus (*Rapid-Random-Tree*, ein zu den *Entscheidungsbäumen* gehörendes Verfahren). Diese oft genutzte Methodik (z. B. bei [274] oder [275]) bestimmt mögliche Trajektorien in einer festen Schrittweite, bis die Planung mit den Hinderniskonturen kollidiert. Gewählt wird dann der Pfad, der die Zielkriterien bestmöglich erfüllt und eine Kollision vermeidet. Ein Grenzfall dieser Planung ist das Engstellenproblem, bei dem eine Re-Orientierung der Komponente notwendig sein kann, um einen möglichen Pfad zu bestimmen. Die Detektion der Produkt- bzw. Hinderniskonturen kann bei dieser Planungsmethodik auch durch Raumpolygone, sog. *Voxel*, erfolgen (vgl. [276]). Hier setzt das Konzept der DEU an, da durch die Daten der SPU, speziell in Verbindung mit einer Flanschkamera ausreichend visuelle Daten vorliegen, um den Arbeitsraum in Form einer Voxel-Karte zu beschreiben (siehe Abbildung 4.26, die Voxel repräsentieren ein Netz aus Würfeln basierend auf einer Punktwolke – für die Pixel des Werkzeugs im oberen Bildbereich konnten aufgrund der geringen Distanz zur Kamera kaum Rauminformationen bestimmt werden). Ein Planungsansatz von *Peng et al.* [277] erweitert überdies das Konzept der Gefahrenzonen um kritische Bereiche im Arbeitsraum. Diese Vorsichtsmaßnahme ist nicht im DEU Konzept enthalten, da die SPU bei der Arbeitsraumüberwachung (siehe 4.3.2) bereits eine Sicherheitszone in Bezug auf den Abstand zu den Mitarbeitern im MRK-Arbeitsraum berücksichtigt. Zu den Komponenten hingegen soll kein zusätzlicher Abstand berücksichtigt werden, um den Arbeitsraum so wenig wie möglich einzuschränken. Beim Umgang mit Gefahrstoffen ist dies jedoch eine mögliche Option.

Der Umstand, dass manche Bauteile für die Demontage nicht als starre Körper angenommen werden dürfen (z. B. beim Entfernen von Clips-Verbindungen), kann analog der Arbeit von *Schneider et al.* [278] behandelt werden. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Bauteile als Starrkörper ist es nicht möglich, eine Menge möglicher Trajektorien zu generieren, wenn die Bauteile im Grundzustand einander berühren (*Invalid Initial State Problem*). Der Algorithmus aus [278] löst dieses Problem, indem die Informationen bezüglich der Flexibilität der Bauteile bei der Pfadplanung berücksichtigt werden. Das Informationsmodell bietet im Rahmen dieses Systemkonzeptes die Möglichkeit, diese Information ebenfalls zu berücksichtigen, wenn sie in den Produktdaten vorliegt.

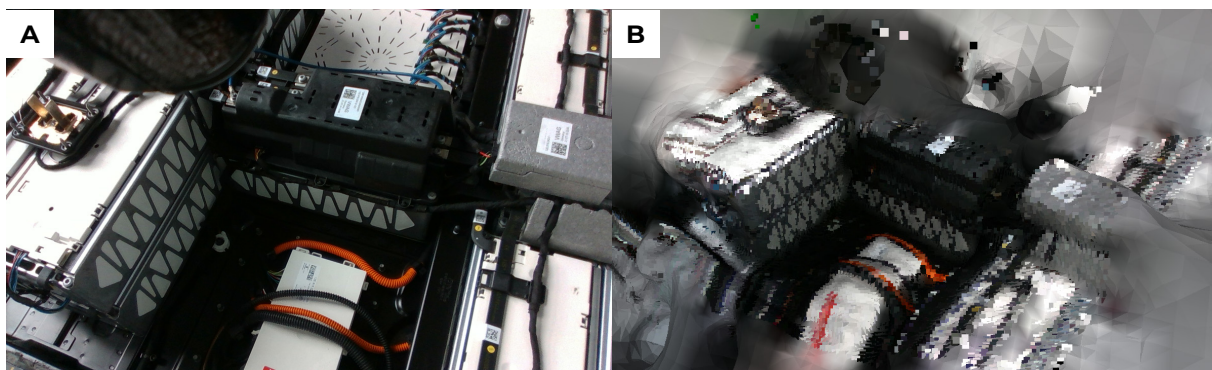


Abbildung 4.26: (A) Exemplarischer Arbeitsraum, (B) Voxel-Netz Arbeitsraum: Oben die Voxel des Schraubwerkzeugs

Eine deutliche Beschleunigung der Pfadplanung unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch optisch detektierte Hindernisse bietet die von *Murray et al.* [279] entwickelte Methodik zu Kollisionsvermeidung. Basierend auf einem Punkteraster, dass durch Trajektorien verbunden wird, werden durch vollständige Parallelisierung der Berechnung auf einer GPU Verbesserungen bis zum Faktor 10^3 erreicht, da die Bestimmung der potenziell kollidierenden Pfade nun unabhängig von der Gesamtanzahl der Optionen erfolgt (bei klassischen RRT-Algorithmen läuft die Berechnung sequentiell ab). Dies erlaubt Neuplanungen bei einer Veränderung der Hindernisse im Bereich von einer Millisekunde, was eine Echtzeit-Pfadplanung ermöglicht. Die Implementierung dieses Verfahrens erfordert aus patentrechtlichen Gründen den Einsatz lizenzierter Hardware.

Die Kollisionsvermeidung ist ebenfalls für die Kooperation zwischen Mensch und Roboter das Schlüsselement in der Pfadplanung. Hierbei wird der Mitarbeiter im Arbeitsraum des Roboters als *Hindernis* in der Planung berücksichtigt, wobei die Kriterien in Bezug auf die Arbeitssicherheit strenger vorgegeben sind als bei der Kollisionsvermeidung mit Produktkonturen. Die Roboterhardware muss dabei für den Einsatz im Rahmen der MRK geeignet sein. Darüber hinaus sind wie bereits in Abschnitt 4.3.2 erläutert die Sicherheitsanforderungen gemäß ISO/TS 15066 [260] zu erfüllen sowie eine Risikobewertung der konkreten Roboterzelle nach DIN EN ISO 12100 [264] zu berücksichtigen. Die Überwachung der Sicherheit der menschlichen Arbeitskräfte erfolgt in diesem Konzept daher primär über die SPU. Um die unterschiedlichen Fähigkeiten von Mensch und Roboter besser zu koordinieren, zeigen *Cesta et al.* [175] ein agentenbasiertes Konzept mit ROS. Hier erfolgt am Beispiel der Demontage eine KI-gestützte Optimierung der Zieldimensionen *Geschwindigkeit* und *Sicherheit* (im Bereich Sicherheit werden natürlich die Mindestanforderungen grundsätzlich erfüllt). Für die DEU soll die Robotersteuerung bei der Pfadplanung unterschiedliche Geschwindigkeitszonen abhängig von der Distanz zum Mitarbeiter berücksichtigen. Ein Nachteil dieser variablen Ausführung ist, dass die Zeitumfänge für kooperative Aktionen nicht verlässlich geplant werden können. Hier bietet die Dokumentation der Prozessdaten daher die Möglichkeit, valide Zeiten für spezifische Aktionen zu sammeln und so die Planungssicherheit für zukünftige Prozessentscheidungen zu verbessern. Das konkrete Erlernen von Aktionen durch den Roboter nach dem Vorbild des Menschen ist aus Komplexitätsgründen im hier gezeigten Konzept nicht vorgesehen, jedoch grundsätzlich ebenfalls möglich (vgl. [79]). Falls ein Pfad nicht funktioniert, da die Planung fehlschlägt oder die Ausführung aufgrund äußerer Einflüsse abbricht, wird der Roboterarm ggf. wieder in Ausgangslage verfahren und eine Informationsmeldung über das HMI an den Mitarbeiter übergeben, in der das Zielbauteil mit den entsprechenden Demontageparametern für eine manuelle Demontage bereitgestellt wird. Die erfolgreiche Ausführung wird daraufhin durch die SPU überwacht und manuell über eine Eingabe im HMI bestätigt.

Um die jeweiligen Pfade und Operationsparameter für eine erfolgreiche Aktion zu dokumentieren und als validiertes Prozesswissen auch für andere Stakeholder zugänglich zu machen, ist es erforderlich, dass das Robotersystem mit einem Informationsstandard zur herstellerübergreifenden Interoperabilität ausgestattet ist. Auf diese Weise kann das Demontagesystem nicht nur auf Grundlage einer dezentralen Wissensbasis agieren, sondern ebenfalls neues (Prozess-)Wissen dazu beitragen. Mittels des in Kapitel 4.4 vorgestellten OPC-UA Protokolls ist es möglich, dieses Ziel zu realisieren, da sogar Steuerungsbeefehle direkt über den Spezifikationsstandard übertragen werden können.

Abschließend ist bei der Operationsplanung des Robotersystems der DEU festzuhalten, dass, wenn alle Bedingungen erfüllt sind, eine Demontageoperation in diesem Konzept auch vollständig autonom geplant und ausgeführt werden kann. Grundsätzlich ist damit neben einem MRK-System auch ein vollautonomes Konzept mit Industrierobotern denkbar, sofern die Aktionen zur Produktdemontage vollständig darstellbar sind.

Werkzeugsystem

Für die adaptive Demontage einer Vielfalt möglicher Produkte ist es erforderlich, dass das Werkzeugsystem in der Lage ist unterschiedliche Verbinderarten zu lösen sowie Handhabungswerkzeuge, wie beispielsweise Greifer, einzusetzen, um die gelösten Komponenten zu entfernen. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, kann zwischen der zerstörungsfreien Demontage, bei der Verbinder und Komponenten intakt bleiben, der teilweise zerstörenden Demontage, bei der die Verbinder zerstört werden und der zerstörenden Demontage, bei der in der Regel sowohl die Verbinder als auch die Komponenten beschädigt werden, differenziert werden. Die zerstörende Demontage bedeutet für den Prozess eine höhere Flexibilität und Effizienz, da der Planungsaufwand der Aktionen geringer ist im Vergleich zum vollständigen Erhalt der Bauteilstrukturen. Da dies eine Wirkung auf die Demontagekosten und damit die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses hat (das Werkzeug hat eine Auswirkung auf den DEI-Index, zuzüglich zu den benötigten Zeitanteilen), ist die Wahl des Werkzeugs auch von der Verwertungsoption der jeweiligen Komponente abhängig. Es ist somit eine Optimierungsaufgabe zwischen Prozessfähigkeit und Wirtschaftlichkeit ein geeignetes Werkzeugsystem bereitzustellen.

Die praktische Entwicklung eines modularen Werkzeugsystems stellt eine komplexe Anforderung dar, die bislang nicht gelöst wurden ist. Es gibt Ansätze von Multi-Funktions-Werkzeugen und Greifern zur Demontage, z. B. bei Borrás *et al.* [280], die sich ein Schweizer Taschenmesser zum Vorbild genommen haben, um einen Endeffektor zu entwickeln, bei dem mehrere Werkzeuge angewendet werden können. Da in dieser Arbeit ein Konzept für ein Gesamtsystem und kein konkretes Seriensystem entwickelt wird, sollen entsprechend der Abgrenzung aus Kapitel 2.1 an dieser Stelle nur die Möglichkeiten und Voraussetzungen eines adaptiven Werkzeugsystems zur Demontage beschrieben werden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird im Rahmen der prototypischen Umsetzung (siehe 4.5) ein Werkzeug vorgestellt, welches für eine spezifische Verbindungsoption eine Anwendung unter Berücksichtigung der Integration in ein übergreifendes Informationsmanagement zulässt.

Die der Werkzeugauswahl entsprechende beispielhafte *SELECTO*-Aktion ist in Tabelle 4.13 in algorithmischer Form dargestellt.

Tabelle 4.13: Algorithmische Darstellung der Werkzeugauswahl im Pseudocode

```
function SELECT [Connector, EoL-Option] returns Tool
  load DisassemblyPartData(Product) //Produktdatensatz für Metainformationen Verbinder
  init int Tool
  //Klassifizierung des Verbindungselementes
  get ConnectionType from DisassemblyPartData()
  get ConnectorType from DisassemblyPartData()
  get EoL-Option from DisassemblyPartData()
  switch ConnectionType: //Auswahl anhand der Verbindungsart
    case Screw: //Verbinderart Schraube
      switch ConnectorType: //Verbindertyp i bis n (vorkommende Schraubentypen)
        case Type(n): //Exemplarisch für jeden Typen einen Case
          set Tool=n
        endswitch
      case Seam:
        set Tool=m //Werkzeugtyp auf Schneidwerkzeug festlegen (nicht spezifisch, Parameter
      case Clip: //Übergabe bei REMOVE-Aktion)
        if EoL-Option=Recycling
```

```

set Tool=p //Werkzeugtyp auf Bohrwerkzeug festlegen
elseif Reuse:
  set Tool=q //Werkzeugtyp auf zerstörungsfreies Verfahren festlegen
endif
endswitch
if QOPT(Verbinder)=positive //Zustand des Verbinders abfragen
  return Tool to ROBOT
else:
  return Tool to HMI //Bei Beschädigung manuelle Demontage mit Info an HMI
endif

```

Für den dargestellten Ablauf wurden exemplarisch die Verbinderarten *Schraube*, *Schweiß-* bzw. *Klebe-naht* und *Clips-Verbindung* betrachtet. In der Praxis können auch andere Verbinderformen vorkommen, die nach denselben Prinzipien in der Werkzeugauswahl berücksichtigt werden müssen. Schrauben sollen im Konzept der DEU unabhängig von der Verwertungsoption zerstörungsfrei demontiert werden, um die Wahrscheinlichkeit der Beschädigung angrenzender Bauteile soweit wie möglich zu verringern. Nach Nave [281] ist diese Vorgehensweise in Bezug auf Zeit, Sortenreinheit und Arbeitsraumbedarf die beste Methodik zur Schraubendemontage. Tritt der Fall von Schraubverbindungen nur selten auf, kann aus Wirtschaftlichkeitsgründen auch eine zerstörende Demontage für Schraubverbindungen implementiert werden. Hierbei liegt ein zusätzlicher Vorteil in der erheblichen Reduktion der Werkzeugvarianten. Nahtverbindungen hingegen werden aufgrund der eingeschränkten technologischen Möglichkeiten grundsätzlich zerstörend demontiert. Weiterhin ist eine Bedingung, dass es aufgrund der Konzeption als MRK-Anwendung und den daraus folgenden Sicherheitsanforderungen nicht möglich ist, bestimmte Anwendungen oder bestimmte Endeffektoren im gleichen Arbeitsraum mit dem Mitarbeiter einzusetzen (z. B. Laser- oder Plasmaschneider, Schneidwerkzeuge mit hochenergetischen, freiliegenden Rotationskörpern). Hier sind geeignete Schutzkonzepte einzusetzen oder es muss eine alternative, gegebenenfalls manuelle Behandlungsmöglichkeit gefunden werden.

Im konkreten Umgang mit Werkzeugen und Handhabungsmitteln sind vor allem Strategien zur Sicherstellung der korrekten Position zur Ausführung der Operation maßgeblich für den Demontageerfolg. In Bezug auf die zerstörungsfreie Demontage von Schrauben ist beispielsweise das Anfahren der Schraubenposition und der Ausgleich möglicher Toleranzen eine Aufgabe, für die auch der Einbezug sensorischer Daten, z. B. von Kraft-/Momentensensorik erforderlich sein kann. Spiralförmige Antast-Algorithmen bieten hier eine effektive Vorgehensweise [281, 282]. Werden für die Demontage MRK-fähige Leichtbauroboter eingesetzt, so können die Sensoren aus dem Roboterarm ebenfalls für den Antastvorgang genutzt werden [283]. Für die Entfernung von Clip-Verbindungen sollte die taktile Sensorik auch mit einer optischen Erfassung kombiniert werden, um die Verformungen bei der Ausführung zu erfassen (vgl. [284]). In Bezug auf die Bestimmung des Produktzustandes können darüber hinaus auch das Verhalten der Demontageparameter wie Drehmoment oder Drehzahl genutzt werden, um zu bestimmen, ob ein Verbindungselement über den Lebenszyklus beschädigt worden ist [285]. Im Bereich der Greiftechnik können spezielle Anfertigungen für bestimmte Produkte erforderlich sein, die wiederum spezifische Sensoren erhalten können (z. B. Spannungsmessung bei Batteriemodulen in [286]).

Das Werkzeugsystem muss in der DEU über ein Protokoll verknüpft sein, welches die Interoperabilitätsanforderungen des Informationsmanagements unterstützt. Die Ausführungsparameter sind dabei als Teil des Prozesswissens zu dokumentieren und sollen in den Austausch mit anderen Stakeholdern der Kreislaufwirtschaft eingebunden werden.

Human Machine Interface (HMI)

Da die Mitarbeitenden im Rahmen der MRK-Interaktion für die Demontage als Agent der DEU definiert werden können, ist es erforderlich, dass die Kommunikation zwischen ihnen und den maschinellen Systembestandteilen zielgerichtet sichergestellt werden kann. Die Interaktion findet dabei im inhaltlichen Kontext unterschiedlicher Anforderungen statt, die jeweils verschiedene Kommunikationskanäle adressieren (siehe Abbildung 4.27). Da die menschlichen Handlungen nicht vorherbestimmt werden können, ist es wichtig, dass neben der Eingabe vor allem auch die Ausgabe von Anweisungen an die Mitarbeitenden entsprechend kommuniziert wird, um die Ausführung von Operationen durch diese sicherzustellen.

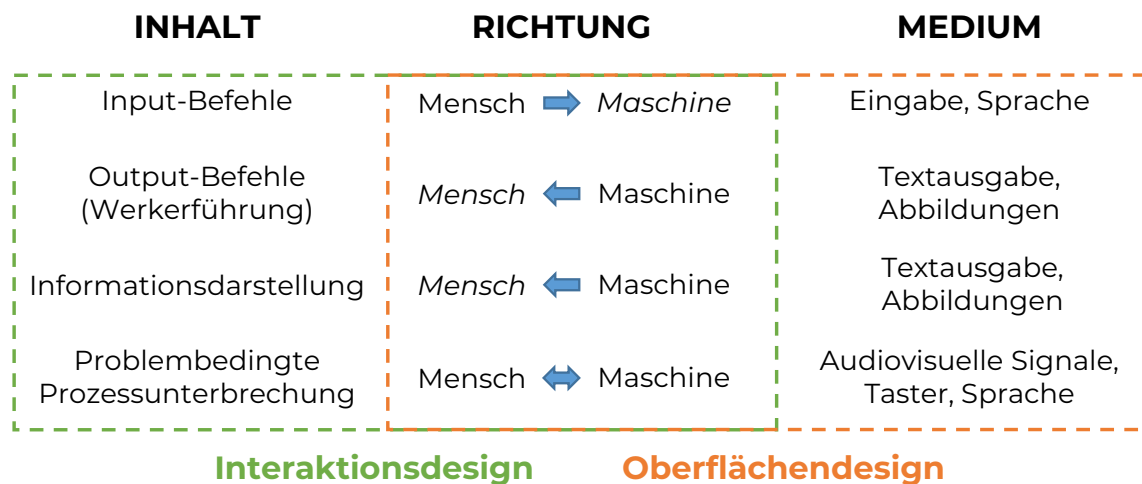


Abbildung 4.27: Konzeptframework Human-Machine-Interface

Auf inhaltlicher Ebene kann zwischen bidirektionaler Befehlsübergabe (den Anforderungen der Mitarbeitenden an das System oder Arbeitsanweisungen an die Mitarbeitenden), Informationsdarstellungen (z. B. zum aktuellen Status der Demontage) und problembedingten Prozessunterbrechungen (sowohl bei automatisierter als auch bei manueller Demontage) differenziert werden. Diese Inhalte müssen im Rahmen der Interaktion zwischen Mensch und Maschine kommuniziert werden, wobei die genutzte Schnittstelle verschiedene Medien für die jeweiligen Inhalte verwenden kann. Das HMI ist damit nicht auf einen konkreten technischen Kommunikationskanal beschränkt, sondern beschreibt die Gesamtheit der Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Mitarbeitenden und Robotersystem.

Für die systematische Gestaltung einer Schnittstelle, die diese Anforderungen erfüllt, muss ein Interaktions- und ein Oberflächendesign entwickelt werden, bei dem die *Gebrauchstauglichkeit* (Engl. *Usability*) im Vordergrund steht. Gebrauchstauglichkeit ist dabei nach der DIN EN ISO 9241-11 [287] vom Nutzungskontext abhängig und kann in den Dimensionen der *Effektivität* zur Lösung einer Aufgabe, der *Effizienz* bei der Bearbeitung und der *Zufriedenheit* des Anwenders gemessen werden. Da die Zufriedenstellung als subjektive Dimension mit den tatsächlichen Nutzern überprüft werden muss, ist eine normgerechte Evaluation im Rahmen der Konzeptentwicklung nicht möglich und wird auch für das HMI des in Kapitel 4.5 vorgestellten Prototypen nicht durchgeführt. Die Effektivität und Effizienz der Interaktion werden hingegen für die Menüführung und wichtige Befehlsketten im Rahmen der Konzeptentwicklung berücksichtigt.

Gemäß den Vorgaben der Norm ist für die Erreichung der Gebrauchstauglichkeit einer Schnittstelle zur Interaktion ein menschenzentrierter Gestaltungsprozess erforderlich [288]. Die Voraussetzung hierfür ist

ein Prozessverständnis, weshalb es sinnvoll ist, diesen Schritt im Kontext der technischen Konzeptentwicklung mit durchzuführen, da vor allem das Interaktionsdesign im Nutzungskontext von besonderer Bedeutung ist. Für die Ausführung der Bedienung muss ebenfalls die *Angemessenheit* der Benutzeraufgaben gegeben sein [289]. Dies schließt *Intuitivität* der Bedienung, *Vorhersehbarkeit des Systemverhaltens* für den Anwender, *Erlernbarkeit* und nicht zuletzt *Robustheit* gegenüber Bedienfehlern ein. Der Schritt der kontinuierlichen Evaluierung und Anpassung muss in der Praxis bei der Implementierung des Konzeptes mit den tatsächlichen Mitarbeitern in der konkreten Unternehmensumgebung durchgeführt werden. Auch interkulturelle Unterschiede sind hier im Rahmen einer globalisierten Kreislaufwirtschaft zu beachten.

Für das Interaktionsdesign soll im Folgenden der Anwendungsfall für einen exemplarischen Demontageablauf graphisch beschrieben werden, der die Grundlage für die Nutzungsanforderungen bestimmt. Die in Abbildung 4.28 gezeigte Interaktionsfolge bildet dabei lediglich eine Auswahl der Bausteine der im Beispielprozess der Batteriedemontage häufigsten Kommunikationskette ab und kann im praktischen Einsatz beliebig angepasst und erweitert werden.

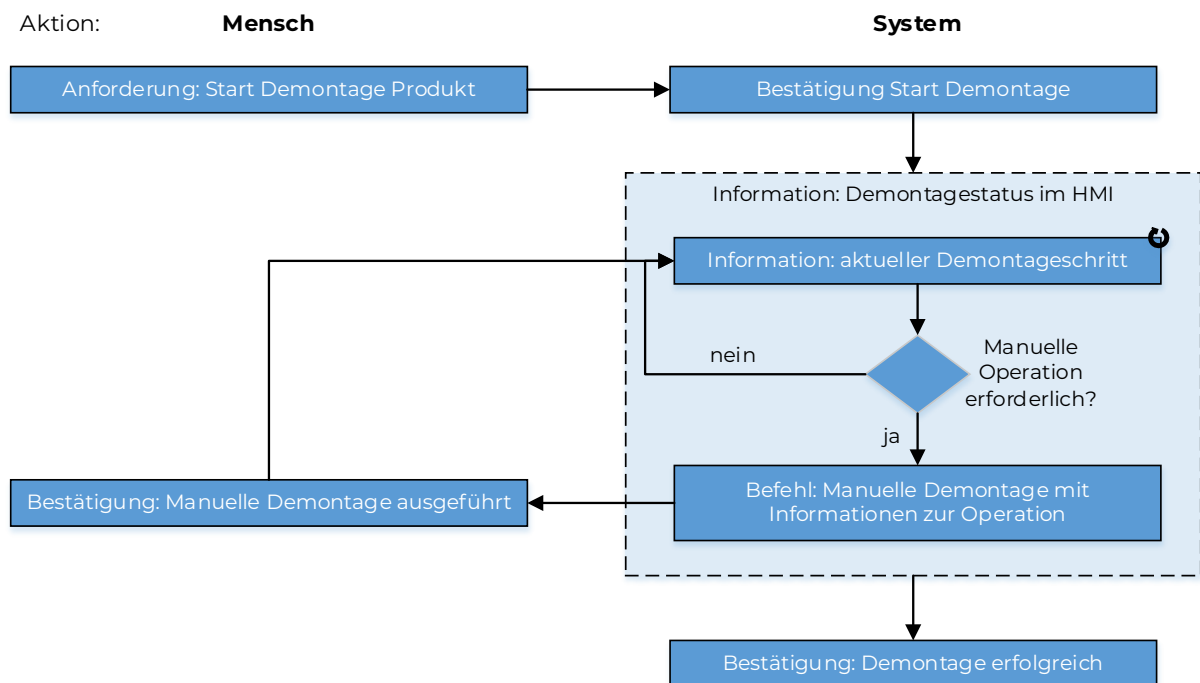


Abbildung 4.28: Beispielhafte Interaktionsfolge im HMI für einen Demontageprozess

Soll beispielsweise die Demontage des gesamten Produktes durchgeführt werden, gibt der Anwender über das HMI den Befehl an das Demontagesystem, welches sich die erforderlichen Informationen beschafft und den Beginn der Demontage bestätigt. Im HMI wird nun über den vom RCP generierten Demontageplan unter Berücksichtigung der EoL-Verwertungsoptionen der Komponenten informiert, bestenfalls unter Zuhilfenahme graphischer Visualisierungsmöglichkeiten. Insofern eine manuelle Operation erforderlich ist, wird eine Anleitung des betreffenden Arbeitsschritts für die Mitarbeitenden visualisiert. Bei auftretenden Problemen ist jederzeit ein Eingriff durch den Anwender möglich.

Im Interface ist es ebenfalls möglich, selektive Demontagesequenzen („Demontage bis Komponente A“) entlang der Vorrangrelationen im Demontageplan aus dem RCP oder einzelne, direkt erreichbare Komponenten auszuwählen. Der Fortschritt wird unabhängig vom Zielbefehl jederzeit visualisiert und kann bei Unterbrechungen, z. B. durch Pausen abgespeichert werden.

In Analogie zu Montagearbeitsplätzen muss auch ein Arbeitsplatz für die hybride Demontage effektiv gestaltet sein. Das HMI kann hier als Industrie 4.0 Assistenzsystem nach *Lotter et al.* [290] verstanden werden, dass die Mitarbeitenden mit spezifischen Anleitungen für die schrittweise gesteuerte Operationsfolge unterstützt. Diese *Werkerführung* soll dabei zum einen *informativ* in automatisierten Aktionspassagen, als auch *instruktiv* bei manuellen Tätigkeiten aufgebaut sein. Befehle aus der DEU werden nach einem standardisierten Muster in Nachrichten für die Mitarbeitenden übersetzt, so führt beispielsweise der Systembefehl

HMIInteraction[*Disassemble*(part *i*, operation *j*(*do*[*REMOVE*(*i*, *do*[*UNFASTEN*(*Y*, ω)])))]

zu der schrittweisen Bildschirmausgabe des Befehlsinhaltes

Demontage Bauteil *i*, Operation *j*: Schritt 1: Verbinder *Y* mit Werkzeug ω lösen. Schritt 2: Bauteil *i* entfernen.

die entsprechend dem Oberflächendesign umgesetzt werden muss, wobei auch Abbildungen aus dem digitalen Informationsmodell verwendet werden können. In die andere Richtung sollen Eingaben der Anwender auch vom System in klar definierte Anforderungen und Befehle übersetzt werden. Eine Besonderheit sind dabei auch die manuell eingegebenen Fehlermeldungen im Problemfall. Um die Auswertung von Fehlermeldungen zu ermöglichen, ist es erforderlich, dass die Mitarbeitenden aus einer möglichst umfassenden Menge an standardisierten Fehlerbeschreibungen auswählen können (z. B. im Drop-Down Menü), sodass häufig auftretende Probleme schnell erkannt und abgestellt werden können.

Auf der Ebene der Kommunikationsmedien soll die Eingabe sowohl textuell als auch mit Hilfe von Sprachbefehlen umgesetzt werden. Hierfür wird eine Webapplikation entwickelt, die die Interaktionen zwischen Mensch und System gemäß den beschriebenen Abläufen ermöglicht und gleichzeitig wichtige Informationen zum Stand der Demontage darstellt (Prototyp siehe 4.5). Im Fall einer manuellen Aktion werden über die Oberfläche Anweisungen für die Mitarbeitenden dargestellt, die die Ausführung der Operation ermöglichen (also den Prinzipien der Werkerführung entsprechend alle erforderlichen Informationen bereitstellen). Eine schnelle Unterbrechung der Operationen im Problemfall wird mit Hilfe von Tastern und Spracheingabe (im aktiven Teil) sowie audiovisuellen Elementen (Hinweisleuchte, Warnton) in der maschinenseitigen Kommunikation sichergestellt.

Technisch müssen die Prozesse des HMI mit den anderen Agenten des Demontagesystems verknüpft sein. Für die Kommunikation von Befehlen und die Übertragung und Darstellung von Informationen zu den Abläufen in den anderen Agenten werden Protokolle festgelegt, die diese Kommunikation effektiv ermöglichen. Die Festlegung der Kommunikationskonzeptes für das vorgestellte System erfolgt in Kapitel 4.4. Hier wird auch die technische Anbindung des HMI vorgestellt.

Zusammenfassend ist die DEU damit in der Lage die Operationsplanung und -ausführung im Robotersystem für die Operationen aus der vom RCP bestimmten Sequenz zu realisieren. Das Werkzeugsystem kann dazu in Abhängigkeit der Verbindungsart und EoL-Option ein geeignetes Verfahren auswählen, um so eine effiziente und möglichst automatisierte Demontage zu ermöglichen. Durch das HMI können die Mitarbeiter im Prozess transparent informiert und bei manuellen Aktionen instruiert werden sowie proaktiv mit dem System kommunizieren. Die Besonderheit des DEU-Konzeptes ist dabei die Fähigkeit, dass eine direkte Verknüpfung mit dem digitalen Informationsmodell, sowohl in Bezug auf die Produkt- als auch auf die Prozessdaten besteht. Auf diese Weise kann valides Prozesswissen gesichert und zur weiteren Verwendung anderen Stakeholdern innerhalb der Kreislaufwirtschaft zur Verfügung gestellt werden.

4.4 Kommunikationskonzept

Um das informationsbasierte Demontagekonzept zu ermöglichen, ist eine übergreifende Strategie für die Kommunikation von Informationen und Befehlssätzen zwischen den Agenten und zu externen Stakeholdern erforderlich. Eingeordnet in das *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0* (RAMI 4.0, siehe Abbildung 4.29) ist das Kommunikationskonzept Gegenstand des *Communication-Layers* und verknüpft alle Hierarchieebenen vom Produkt über die Feld- und Prozessebenen bis hin zu der unternehmensübergreifenden *Connected World* [291]. Besondere Wichtigkeit hat daher, dass die systemübergreifende *Interoperabilität* im Kommunikationskonzept für eine informationsbasierte Kreislaufwirtschaft berücksichtigt wird.

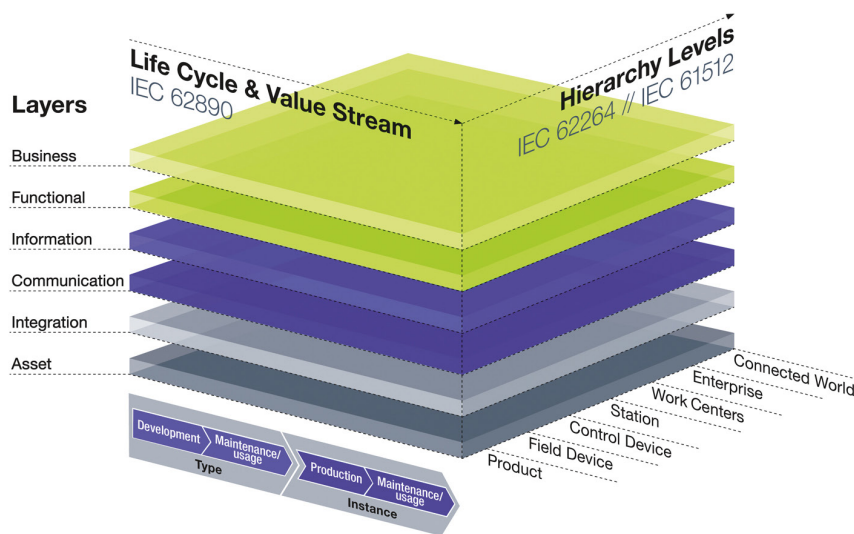


Abbildung 4.29: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 [291]

Dabei kann die Kommunikation wie in Abbildung 4.30 dargestellt in Form einer Matrix organisiert werden, wobei nach Kommunikationspaaren (*Mensch-Mensch*, *Mensch-Maschine*, *Maschine-Maschine*) und nach der Kommunikation in Bezug auf die Grenzen des Robotersystems (*intern*, *extern*) differenziert werden kann. Der Großteil der Kommunikation läuft im Bereich der Maschine-zu-Maschine Kommunikation (M2M, Engl. *machine-to-machine*) ab und beschränkt sich auf den internen Austausch zwischen Systemagenten. Da im Rahmen der MRK der Demontagemitarbeiter als Teil des Systems betrachtet wird, fällt die Kommunikation im HMI ebenfalls unter die Gruppe der internen Kommunikationsformen. Die Nebenprozesse der direkten Interaktion mehrerer Demontagemitarbeiter und der Austausch zwischen verschiedenen Stakeholdern liegen außerhalb der Systemgrenzen und werden daher nicht näher berücksichtigt. Die Marktplatzkommunikation beschreibt die externe Akquise des digitalen Produktmodells und stellt daher einen Systemprozess der Informationsübertragung des RCP dar.

Für die M2M-Kommunikation wird im Folgenden ein Protokollstandard ausgewählt, der die Anforderung der systemweiten Interoperabilität über alle Hierarchieebenen sowie die Repräsentation des Informationsmodells gewährleisten kann. Im Bereich der Steuerungs- und Feldebene ist darüber hinaus eine geringe Paketumlaufzeit ein wichtiges Kriterium für die Auswahl eines geeigneten Protokolls. Die Mensch-zu-Maschine Kommunikation und damit das HMI stellen neben der technischen Integration auch Anforderungen an die Usability, die bereits in Abschnitt 4.3.3 behandelt wurden. Dieses Kapitel schließt mit einem Beispiel für eine erfolgreiche Kommunikationssequenz im Rahmen des Prototyps.

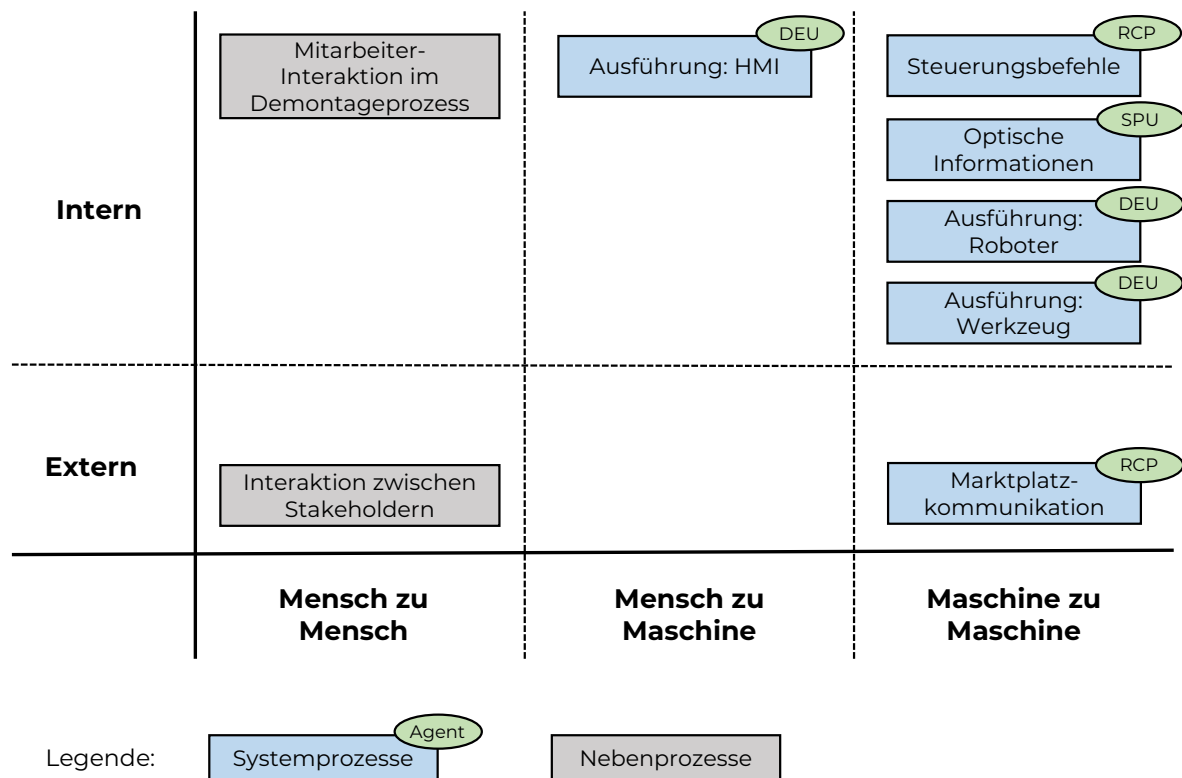


Abbildung 4.30: Kommunikationsmatrix für System- und Nebenprozesse

In Bezug auf die Sicherstellung einer systemübergreifenden Interoperabilität kommen grundsätzlich mehrere Protokollformen in Frage. *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA) als standardisierte Plattformarchitektur zum Datenaustausch in vernetzten Industriesystemen [292], *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) als energiesparendes und schlankes Protokoll zur Nachrichtenübertragung [293] oder das *Robot Operating System* (ROS) als flexibles, herstellerübergreifendes Framework aus der Robotikentwicklung [294] bieten als eine Auswahl der verbreitetsten Architekturen unterschiedliche Kommunikationsmethoden, die im Kontext des Demontagesystems genutzt werden können.

Um die spezifischen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen *Middleware* systematisch einzuordnen haben Profanter et al. [295] die Protokolle in einem methodischen Vergleich untersucht (siehe Tabelle 4.14). Es zeigt sich, dass OPC UA die weitreichendsten Funktionen hat und vor allem in Bezug auf die Repräsentationsfähigkeit semantischer Datenmodelle ein Alleinstellungsmerkmal bietet. Die im industriellen Einsatz wichtigen Anforderungen an die Übertragungssicherheit durch ein entsprechendes Authentifizierungs- oder Verschlüsselungsverfahren bieten standardmäßig nur OPC UA und MQTT, wobei es mit Hilfe von Community-Packages bei ROS die Möglichkeit gibt, ähnliche Funktionen zu implementieren. Ein deutlicher Unterschied der Protokolle ist im Bereich der Netzauslastung feststellbar. Durch den relativ großen Overhead, welcher der standardisierten Modellstruktur geschuldet ist, hat OPC UA die höchste Auslastung pro Nachricht. Bei Berücksichtigung der Initialisierung der Verbindung wird hingegen deutlich, dass die Auslastung für eine ROS-Kommunikation insgesamt deutlich höher ist. Dadurch, dass MQTT keinerlei Datenstrukturen mitüberträgt und der Protokoll-Overhead sehr gering ist, ist dieses Protokoll im Vergleich am effizientesten, bietet dafür aber weniger Funktionen. Bei der Umlaufzeit ist MQTT langsamer als die Vergleichsprotokolle, da die Nachricht hier prinzipbedingt über einen Broker gesendet wird, anstelle einer *Peer-to-Peer* Verbindung wie bei OPC UA und ROS.

Tabelle 4.14: Vergleich der Frameworks OPC UA, MQTT und ROS aus [295]

Eigenschaft	OPC UA	MQTT	ROS
Kommunikationsprotokoll	TCP, UDP	TCP	TCP, UDP
Muster	RPC ²⁰ , Publisher / Subscriber	Publisher / Subscriber	RPC, Publisher / Subscriber
Quality of Service (QoS)	Nein	Ja	Nein
Authentifizierung	User, PKI	Mac-Adresse	User, PKI
Verschlüsselung	Ja	Ja	Nein
Standard-API	Nein	Nein	Nein
Semantische Datenmodelle	Ja	Nein	Nein
Netzauslastung (Overhead pro Nachricht / Verbindungsaufbau)	96 / 632 Bytes	5 / 17 Bytes	8 / 8915 Bytes
Umlaufzeit Echonachricht (512 Byte Nachricht, TCP/IP, CPU: Idle)	456 μ s	694 μ s	495 μ s

Auf Basis dieser Einordnung soll für den Informationstransfer OPC UA verwendet werden, da es mit der Modellstruktur die beste Repräsentationsmöglichkeit digitaler Produktabbilder in Form semantischer Daten bietet. Dies schließt ebenfalls die Möglichkeit der Bereitstellung von Sequenzdaten in der Demontage ein, wie von *Kim et al. [99]* bereits nachgewiesen wurde. Für die Kommunikation von Befehlen wird MQTT verwendet, da es mit geringen Datenlasten auch in verteilten Systemen und mit Edge-Computing Hardware eine effiziente Performance und schnelle Kommunikationsintervalle ermöglicht. Durch die geringe Größe der Nachrichten wird überdies weniger Rechenleistung benötigt, was die etwas langsameren Umlaufzeiten kompensiert. Nach einer praktischen Untersuchung von ROS wurde sich gegen den Einsatz dieses Frameworks im Demontagesystem entschieden. ROS ist zwar geeignet die Prozessdaten reproduzierbar und effektiv zu kommunizieren, erfordert allerdings einen hohen Integrations- und Wartungsaufwand sowie ein umfassendes Versionsmanagement, was eine Anwendung in verteilten Systemen und bei unterschiedlichen Stakeholdern erheblich erschwert.

Die hybride Kommunikationsarchitektur aus OPC UA und MQTT Modulen ist in Abbildung 4.31 dargestellt. In der M2M-Kommunikation wird zwischen Datenendpunkten (DEP), Datenintegrationspunkten (DIP) und dem Kommunikationsnetzwerk (MCN) unterschieden [297]. DEP sind Systembestandteile, deren Informationen überwacht und zur Verarbeitung in den Systemprozessen verwendet werden. DIP hingegen sind zentrale Komponenten, in denen die Datensammlung zusammenläuft und die Verarbeitung stattfindet. Im Demontagekonzept ist der RCP der DIP, da hier alle Datenanforderungen und Datenverarbeitungsprozesse konzentriert sind. Die anderen Systemagenten beschreiben daher definitionsgemäß DEP, wobei zwischen den internen DEP (den eigentlichen Systemagenten) und externen DEP (dem Informationsmarktplatz als zentraler Datenquelle) unterschieden werden kann. Durch die Kombination der Informationen aller DEP im DIP kann darüber hinaus neues Wissen gewonnen werden. Grundlage der Verbindung der einzelnen Agenten ist TCP-IP als Hardwareprotokoll, da Ethernet-basierte Verbindungen im Rahmen der IoT-Anwendungen durch Echtzeit-Eigenschaften klassische Feldbus-Systeme immer weiter ablösen und den Vorteil der weiten Verbreitung, vor allem in Edge-Computing Devices und daraus folgenden geringeren Anschaffungskosten bieten (vgl. [298]).

²⁰ **Remote Procedure Call:** Der *entfernte Prozeduraufruf* beschreibt die Möglichkeit einen Funktionsaufruf in einem Netzwerk auf einem anderen Computer zu starten [296] Es handelt sich damit um eine Möglichkeit, ein *Client-Server Modell* zu implementieren.

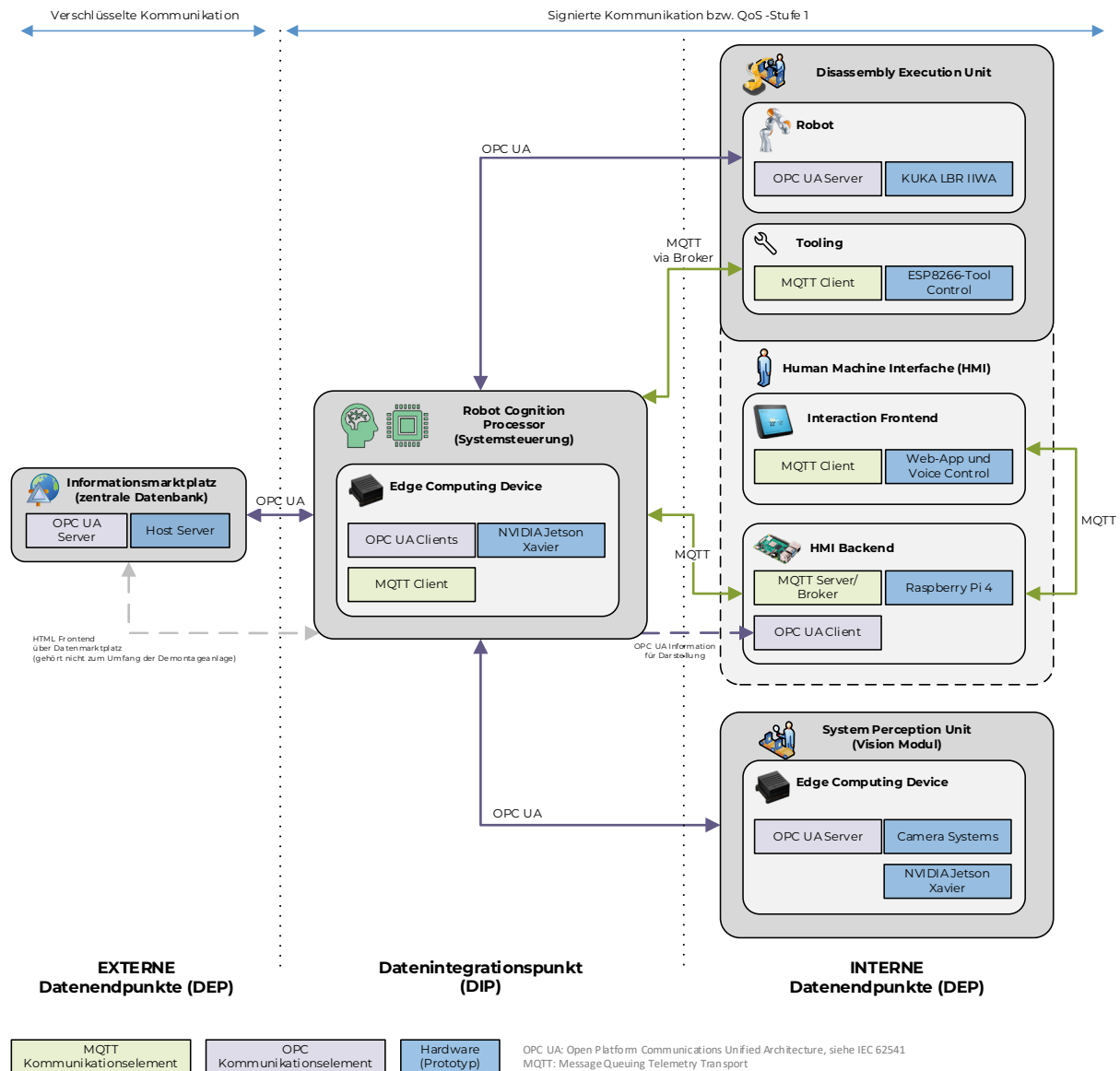


Abbildung 4.31: Hybride Kommunikationsarchitektur des Demontagesystems

Alle Elemente, die mit dem Informationstransfer auf Basis des ganzheitlichen Datenmodells verknüpft sind, nutzen OPC UA als MCN-Protokoll. Hierbei ist die Quelle des Informationsmodells der Informationsmarktplatz und damit der OPC UA Server. SPU und der Roboter als Hauptelement der DEU sind ebenfalls OPC UA Server, da die SPU die optischen Informationen zum Datenmodell hinzufügt und der Roboter gemäß der OPC UA Spezifikation für Robotik (VDMA 40010, [299]) auch als Datenmodell abgebildet wird, was den Vorteil hat, dass die Prozessinformationen ebenfalls standardisiert zur Verfügung gestellt werden können. Der RCP beinhaltet als DIP für jeden verknüpften OPC UA Server einen entsprechenden Client, der den Lese- und Schreibzugriff auf die Datenmodelle ermöglicht.

Für die MQTT Kommunikation stellt das HMI-Backend den MQTT Server bereit, über den als Broker alle MQTT Nachrichten im System verteilt werden. Der Befehl der Demontageanforderung kann manuell über das HMI erfolgen, oder automatisiert über den RCP gestartet werden. Das Werkzeugmodul ist aus technischen Gründen mit einer MQTT-Steuerung konzipiert worden, da hier nur Befehle empfangen und ausgeführt werden. Soll in einer industriepraktischen Implementierung ein Werkzeugwechselsystem installiert werden, das ebenfalls Informationen für das Datenmodell bereitstellt, könnte auch hier ein OPC UA Server verwendet werden. Alle Systembestandteile sind diesbezüglich flexibel.

Die Umsetzung des Informationsmodell-Konzeptes in OPC UA verfolgt das in Kapitel 4.3.1 genannte Ziel, ein übergreifendes Datenmodell für eine gemeinsame Ontologie der Demontageautomatisierung zu implementieren. Diese gemeinsame Beschreibungssprache ist ein Schlüsselement der übergreifenden Kommunikation von CPS (siehe z. B. [119]). Produkte, Prozesse und Equipment sollen demnach in einer gemeinsamen Modellcharakteristik verknüpft werden.

Das verwendete OPC UA Datenmodell folgt in seinem Aufbau der Funktionsstruktur der Teilspezifikationen des OPC Architekturkonzeptes aus Teil 1 der Kernspezifikationen [292]. Die allgemeine Architektur ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Die Möglichkeit der Übermittlung von Metadaten stellt hierbei das entscheidende Kriterium für die Verwendung von OPC UA dar, da hierdurch komplexe Funktionen auf Basis von semantischen Interpretationen möglich sind. Auf diese Weise wird eine Ontologie geschaffen, die Produkt- und Prozesswissen kombiniert. Die Basisspezifikation von OPC UA beschreibt die grundlegende Infrastruktur, die konkreten Informationsmodelle werden von den Herstellern selbst bereitgestellt oder können durch Anwender den einzelnen *Companion Specifications* folgend angelegt werden. Typenhierarchien und Vererbung ermöglichen es, dass die Clients alle Instanzen desselben Typs analog verwenden können [300]. So können in einem übergreifenden Verbundsystem beliebig viele Stakeholder die Informationsmodelle der automatisierten Demontage nutzen und dabei sowohl Produkt- als auch Prozessinformationen in Form der standardisierten Modelle abrufen. Dies bedeutet beispielsweise, dass auch unterschiedliche Robotertypen identische Prozessinformationen verwenden können, wenn beide Roboter konform zu VDMA 40010 abgebildet worden sind. Hierfür ist es lediglich erforderlich, einen OPC UA Server einzubinden (Clients hingegen haben nur Lese- und Schreibzugriff, können jedoch keine neuen Modellstrukturen erzeugen). Ein System kann als *Client-Server*, *Chained-Server*, *Server-Server* oder *Aggregating Server* Struktur aufgebaut sein [300]. Das Netzwerk jedes Stakeholders bleibt dabei grundsätzlich erweiterbar, sodass einzelne *Nodes* (Objekte im Informationsmodell) hinzugefügt und weitergegeben werden können. Diese Struktur wird als *AdressSpace* bezeichnet. Ein *AdressSpace* besteht aus Nodes und *References*, den Verweisen zwischen den einzelnen Objekten. Ein Node kann Variablen und Methoden enthalten (siehe Abbildung 4.32, Information Access). Im Informationsmodell sind jedem Knoten ebenfalls spezifische Knotenattribute zugeordnet, die für eine eindeutige Adressierung im Server erforderlich sind [301].

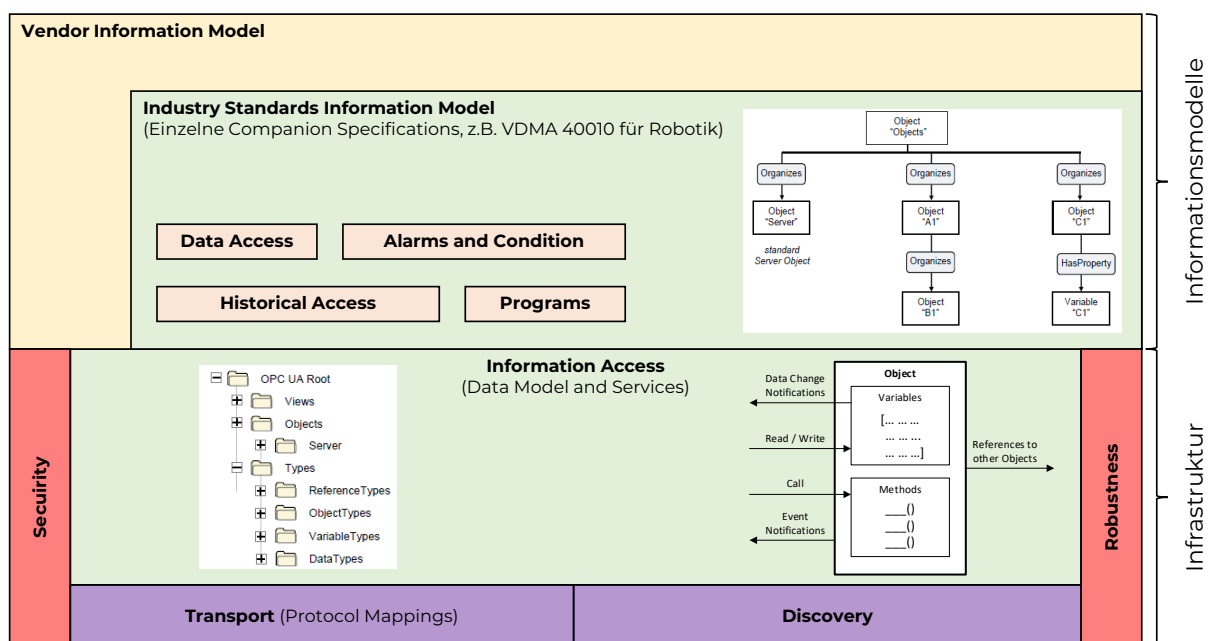


Abbildung 4.32: OPC UA Architektur des Informationsmodells nach [302]

Die konkrete Wissensrepräsentation im Kommunikationskonzept der Demontageeinheit kann in Abbildung 4.33 nachvollzogen werden. Am Beispiel eines Demontagevorgangs der prototypischen Batteriedemontage ist das Ergebnis in einem Datentyp *DisassemblyResult* dargestellt. Die einzigen Verbindungsformen im Beispiel sind Schrauben (vgl. 4.5). Das Ergebnis enthält neben den IDs zur Bestimmung des betreffenden Bauteils (*NodeID*) im jeweiligen Produkt (*VehicleID*) den Erfolg als boolesche Variable, die benötigte Demontagezeit und Informationen über die Verbindungselemente sowie den Stand der Demontage. Das korrespondierende Bauteil ist ebenfalls dargestellt. Neben den Koordinaten des Bauteilmittelpunktes im Demontagebereich werden Zustand (*ConditionQopt*), Demontagezeitpunkt und EoL-Verwertungsoption (*EoLTarget*) als Ergebniswert aus dem RCP-Subprozess abgebildet. Das Feature Set enthält den dem jeweiligen Bauteil allokierten Datensatz und kann in seiner Größe variieren. Diese Daten liegen ebenfalls im Objekt unter der zugehörigen *NodeID* vor, können jedoch über den Typ *DisassemblyPartData* in einem einzigen Call abgerufen werden. Der Datentyp *ScrewData* fasst die erforderlichen Daten für jede Schraube am Zielbauteil zusammen. Neben den Koordinaten enthält er Schraubentyp und Zustandsdiagnose. Die Schraubentypen werden in einer Liste abgebildet.

Für die Verarbeitung im RCP wird der Feature-Datensatz des zu demontierenden Objektes als CSV-Datei benötigt. Die dafür erforderlichen Parser zwischen dem OPC Modell und dem tabellarischen Datensatz müssen für jedes Objekt spezifisch angewendet werden. Ein standardisierter Parser wäre möglich, wenn das digitale Produktmodell im Rahmen eines branchenübergreifenden Standardisierungskonzeptes auf eine festgelegte Auswahl an Features beschränkt würde. Für einen industriellen Anwendungsfall ist diese Vorgehensweise zu bevorzugen, jedoch nicht zwingend notwendig.

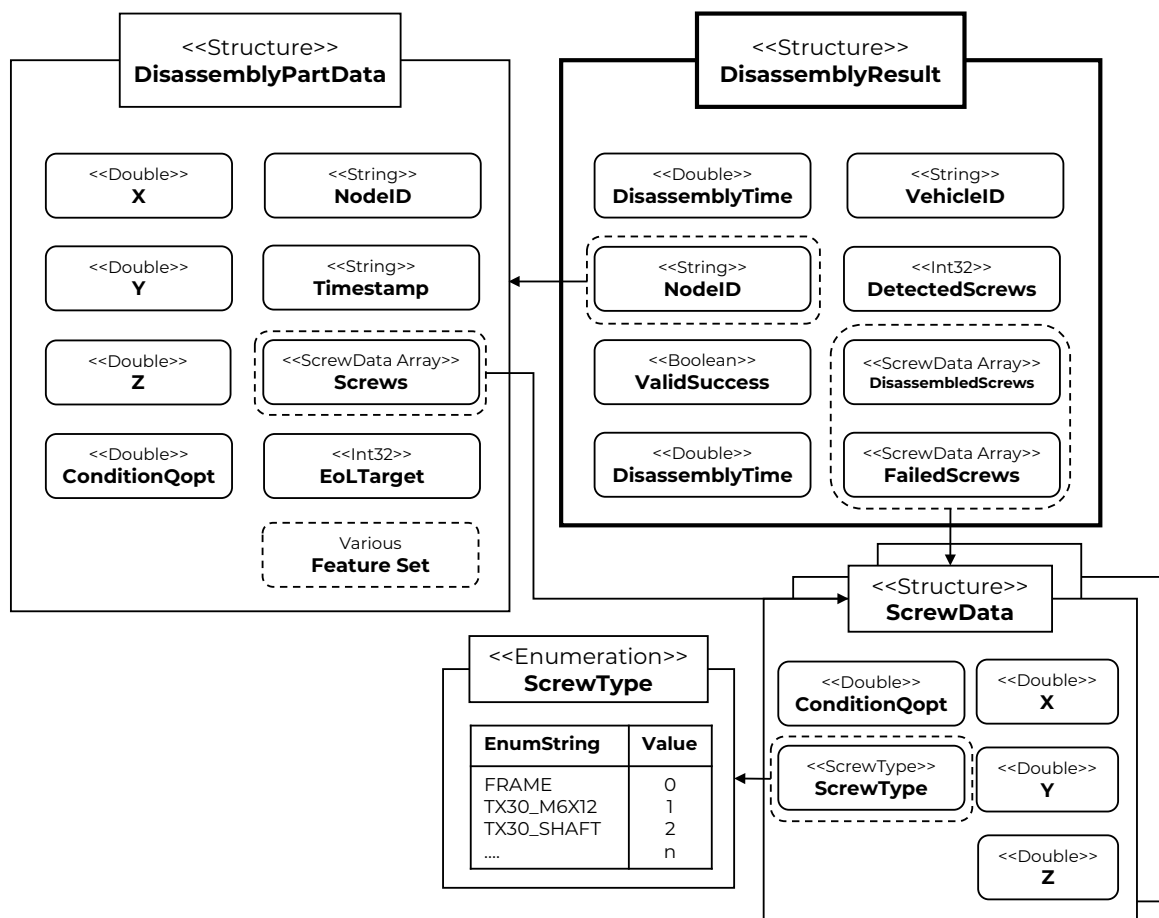


Abbildung 4.33: Beispielhafte OPC UA Objektstruktur des konzipierten Informationsmodells

Das Informationsmodell des Roboters nach VDMA 40010-1 [299] kann entsprechend der herstellerspezifischen Eigenschaften des Roboters implementiert werden und ist in der Richtlinie umfangreich beschrieben. Der wichtigste Bereich des Modells ist *RobotControl*, der die Komponenten *MotionGroupMethods* und *MoveRobotMethods* enthält, um den Roboter via OPC UA zu steuern. Zusätzlich benötigte Methoden, z. B. *StartDisassembly*, *PauseDisassembly*, *ResumeDisassembly*, und *AbortDisassembly* werden unter der Klasse *DisassemblyManager* zusammengefasst und erweitern die *RoboticsAPIApplication*. Im Rahmen der Schnittstellenumsetzung ist das Roboter-Informationsmodell als OPC UA Server implementiert. Das Abbild wird zyklisch aktualisiert und kann somit zu jedem Zeitpunkt von den verknüpften Clients ausgelesen werden. Im Rahmen von Versuchen hat sich eine Aktualisierungszeit von 500 Millisekunden als ausreichend herausgestellt.

Aspekte wie *Quality of Service* (QoS) und Sicherheit spielen im Kommunikationskonzept ebenfalls eine wichtige Rolle. QoS wird in echtzeitorientierten Systemen anhand von Rechenzeit, Netzwerklast und Antwortverhalten klassifiziert [303]. Vor allem das Antwortverhalten ist für die Übertragung von Befehlen von großer Bedeutung. Bei MQTT gibt es für QoS drei relevante Stufen:

- QoS 0: Basislevel des TCP-Protokolls. Die Nachricht wird nicht bestätigt und bei Fehlschlag nicht erneut zugestellt. Geringer Overhead.
- QoS 1: Es wird durch Bestätigung garantiert, dass der Empfänger die Nachricht mindestens einmal erhalten hat. Bleibt die Bestätigung aus, wird erneut versendet. Duplikate müssen daher im Empfänger erkannt werden. Höherer Overhead.
- QoS 2: Garantiert, dass die Nachricht dem Empfänger genau einmal erreicht, was einen vierteiligen Handshake der Netzwerkteilnehmer erfordert. Hohe Komplexität und hoher Overhead.

Aufgrund der Anforderungen der Demontageanwendung wird für das MQTT-Befehlssystem im lokalen Netzwerk die QoS-Stufe 1 festgelegt. Eine Verschlüsselung wird für den lokalen Befehlsteil nicht vorgeschlagen, da lokale Firmennetzwerke i. d. R. durch eine Firewall und andere Sicherheitsmaßnahmen ausreichend gegenüber externen Angriffen geschützt sind, und die Nachrichten dadurch deutlich langsamer verarbeitet werden würden. Für die OPC UA Verbindung wird durch die Client-Server Struktur der Empfang der Nachricht sichergestellt, allerdings ist die Laufzeit hier nicht für Echtzeitanwendungen spezifiziert [304]. Dies ist für die Übertragung der Informationsmodelle unerheblich, da Latenzen im Millisekunden-Bereich im Betrieb keine negativen Auswirkungen haben und gering sind im Verhältnis zur Rechenzeit der Informationsverarbeitung. Die Sicherheitsrichtlinien der OPC Server werden so konfiguriert, dass für die lokale Kommunikation keine Verschlüsselung erfolgt, die Daten jedoch signiert werden. Verschlüsselung bedeutet immer zusätzliche Datenlast und Zeitaufwand. Für die Kommunikation mit externen DEP wie dem Informationsmarktplatz wird eine 256 bit-Verschlüsselung implementiert, da die Informationsmodelle im Kontext des übergreifenden Kreislaufwirtschaftskonzeptes ein wertvolles und zu schützendes Gut darstellen.

Die technische Integration des Teilprozesses der Mensch-Maschine-Kommunikation des HMI erfolgt über einen HTTP-Webhost, der mit der MQTT-Befehlsstruktur verknüpft ist. Hier wird für das lokale Netzwerk der Demontagezelle eine Website gehostet, auf der die in 4.3.3 beschriebene HMI-Umgebung von beliebigen Endgeräten abrufbar ist. Für die Realisierung wird der sog. *LAMP*-Stack als Softwarekombination vorgeschlagen und umgesetzt (Linux-System, Apache Webserver, MySQL-Datenbank und PHP-Skriptsprache). Aus der Website-Umgebung heraus können durch Auswahl der entsprechenden Schaltflächen Befehle über das PHP-Skript an den MQTT-Broker gesendet werden. Da die Bedienung für größtmögliche Usability konzipiert wurde, wird darüber hinaus auch eine Sprachsteuerung über die *Amazon-Alexa* Umgebung implementiert (nach Vorbild von Jungbluth et al. [84]).

Ein vollständiger Kommunikationsablauf innerhalb der vorgestellten Architektur ist für einen allgemeinen Demontagevorgang in Abbildung 4.34 als UML-Sequenzdiagramm dargestellt. Die Demontagemitarbeiter lösen den Vorgang durch einen synchronen Operationsaufruf an das HMI aus, was vom HMI bestätigt wird. Eine asynchrone Nachricht wird über den MQTT-Befehlskreislauf an den RCP weitergegeben. Dieser startet daraufhin das Ereignis der internen Wissensüberprüfung und ruft die produktindividuellen Daten für alle Komponenten über die externe, verschlüsselte OPC UA Verbindung vom Informationsmarktplatz ab, die nach positiver Validierung der Zugriffszertifikate an den RCP übertragen werden. In einer stufenweisen Schleife wird daraufhin die komponentenweise Demontage ausgeführt: Die SPU wird angesteuert, bei der die Identifikation, Detektion und Bewertung als zyklisches Ereignis ausgeführt wird. Die gewonnenen Informationen werden dann als asynchrone Antwort an den RCP zurückgegeben, der daraufhin das Ereignis der Wissenssynthese startet. Das Entscheidungsmodul wird als Folgeereignis gestartet und bestimmt das Verwertungsziel. Die daraus und aus dem Modell folgende Demontagesequenz wird dann OPC UA konform nach der VDMA 40010-1 für das Robotermodell und Werkzeugmodul an die DEU übertragen und das Demontageereignis kann gestartet werden. Hierbei löst der Roboter im Rahmen seiner Programmierung die MQTT Befehle an das Werkzeugmodul aus. Eine zyklische Ausgabe des aktuellen Demontagestatus vom RCP an das HMI erlaubt eine Zustandsüberwachung. Validierte Prozessdaten (vom Typ *DisassemblyResult*) werden nach erfolgreicher Demontage an den RCP zurückgegeben. Dieses Wissen kann in einem letzten Schritt an den Marktplatz zurückgegeben und anderen Teilnehmern der Kreislaufwirtschaft zur Verfügung gestellt werden. Für den Teil der zyklischen Demontageausführung ist es darüber hinaus möglich, dass die Mitarbeitenden im Problemfall in den Ablauf manuell eingreifen können.

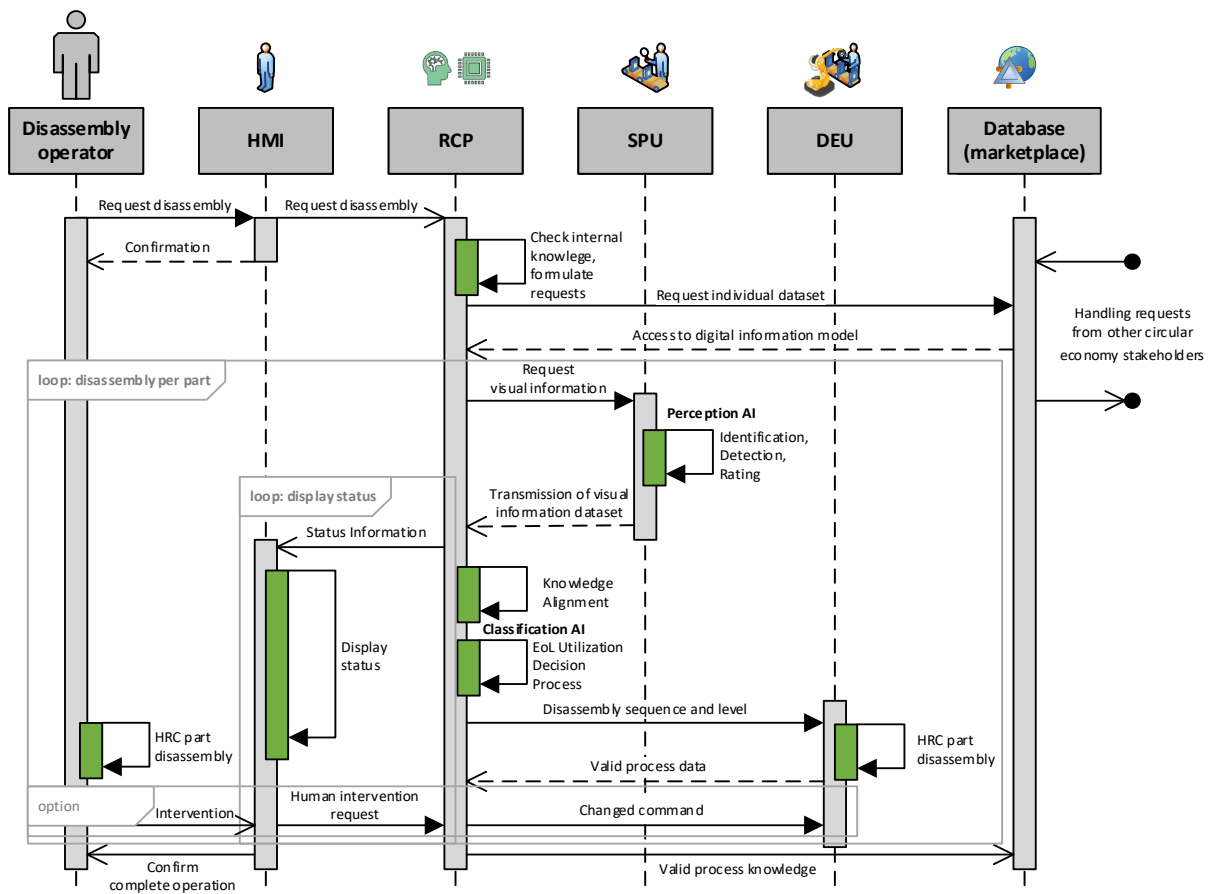


Abbildung 4.34: UML-Sequenzdiagramm der Systemkommunikation für einen beispielhaften Demontageablauf [305]

4.5 Prototypische Umsetzung

Das im Kapitel 4.3 entwickelte Konzept einer automatisierten Demontage auf Grundlage eines umfassenden Informationsmanagements soll zur Evaluation der Forschungsziele an einem Fallstudienbeispiel in vereinfachter Form umgesetzt werden. Es wurden dabei, ausgehend von den Anforderungen die aus dem Stand der Wissenschaft und Technik abgeleitet wurden, die im Konzept umgesetzten Funktionen definiert. Die Validierung an sich ist Gegenstand des Kapitels 5. In diesem Abschnitt soll zunächst das Beispielprodukt, welches demontiert werden soll vorgestellt und prozessseitig eingeordnet werden. Es wird die physische Demontageoperation definiert, an der die Evaluation durchgeführt werden soll. Anschließend wird der Prototyp aus dem Forschungsprojekt *Recycling 4.0* vorgestellt und die einzelnen Systembestandteile in Bezug auf das in dieser Arbeit entwickelte Konzept eingeordnet. Der Demonstrator ist dabei, bedingt durch den Umfang des Forschungsprojektes und das zur Verfügung stehende Budget, in einigen Punkten des Konzeptes eingeschränkt (z. B. in Bezug auf ein Werkzeugmanagement-System für unterschiedliche Demontagearten). Diese Einschränkungen haben jedoch keine Auswirkungen auf den grundsätzlichen Funktionsnachweis des Systemkonzeptes im Kontext der Forschungshypothesen.

Als Beispiel für ein zu demontierendes Produkt wurde im Forschungsprojekt die *Elektro-Traktionsbatterie* (im Folgenden als *Batterie* bezeichnet) als innovatives Fahrzeugsystem mit hoher Relevanz für die Recyclingbranche ausgewählt. Im Zuge der Mobilitätswende haben reine Elektrofahrzeuge oder Hybride perspektivisch die höchste Relevanz im Individualverkehr der nächsten Dekade²¹. Batterien haben als komplexes Bauteil hohe Wertschöpfungsanteile an den Fahrzeugen sowie wertvolle Materialzusammensetzungen, was ein großes Potenzial im Bereich der Aufarbeitung, Weiternutzung von Teilkomponenten oder dem stofflichen Recycling birgt. *Elwert et al.* [307] beschreiben unterschiedliche Recyclingprozesse, die alle von einer sortenreinen Demontage der Batterien profitieren. Bis zum Jahr 2025 werden hier etwa zwei Millionen EoL-Batterien prognostiziert, nach Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren pro Fahrzeug bzw. 80% *State-of-Health* (SoH) als Grenzwert der Batterietauglichkeit²². Gerade bei den ersten Modellen ist mit einer hohen Variantenvielfalt und niedrigen Volumen pro Bauform zu rechnen, sodass die Automatisierung der aktuell ausschließlich manuell durchgeführten Batteriendemontage eine relevante Entwicklungsaufgabe darstellt, bei der das hier erarbeitete Konzept zum Einsatz kommen kann.

Um ein konkretes Produkt betrachten zu können, wurde die Batterie des *Volkswagen e-up!* (Modelljahr 2014) ausgewählt. Es handelt sich hier um die Batterie eines vollelektrischen Fahrzeuges. Die Batterie hat ein Gewicht von 230 kg und besteht aus 2 x 102 parallel geschalteten Batteriezellenpaaren in 17 Batteriemodulen. Jedes Modul hat einen Temperaturgeber sowie je 6 parallel und 6 in Reihe geschaltete Zellen. Jede der Lithium-NMC-Zellen (chemisch: LiNiCoMnO_2) hat eine nominale Spannung von 3,75 V bei einer elektrischen Ladung von 25 Ah. Die Nennspannung des Gesamtsystems liegt bei 374 V und die Gesamtladung bei 50 Ah, womit das System eine Gesamtenergieausbeute von 18,7 kWh bietet. Neben den Modulen besteht die Batterie wie in Abbildung 4.35 dargestellt aus einem Steuergerät für die Batterieregelung, einem Steuergerät für die Modulüberwachung von Batterien, einem Schaltkasten sowie der internen Verkabelung und den Lade- und Hochvoltanschlüssen. Für die physische Demontageoperation in diesem Fallbeispiel soll die Moduldemontage durchgeführt werden.

²¹ Die *International Energy Agency* (IEA), ein internationaler Branchenverband, spricht im Zuge einer Studie zur Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen von einer kommenden Dekade der Elektromobilität [306].

²² Der Wert von 80% SoH ist in Forschung und Industrie als Grenze sehr verbreitet. Neuere Untersuchungen zeigen, dass auch Werte von 60-70% als Grenzzannahme realistisch sind (vgl. [308]).

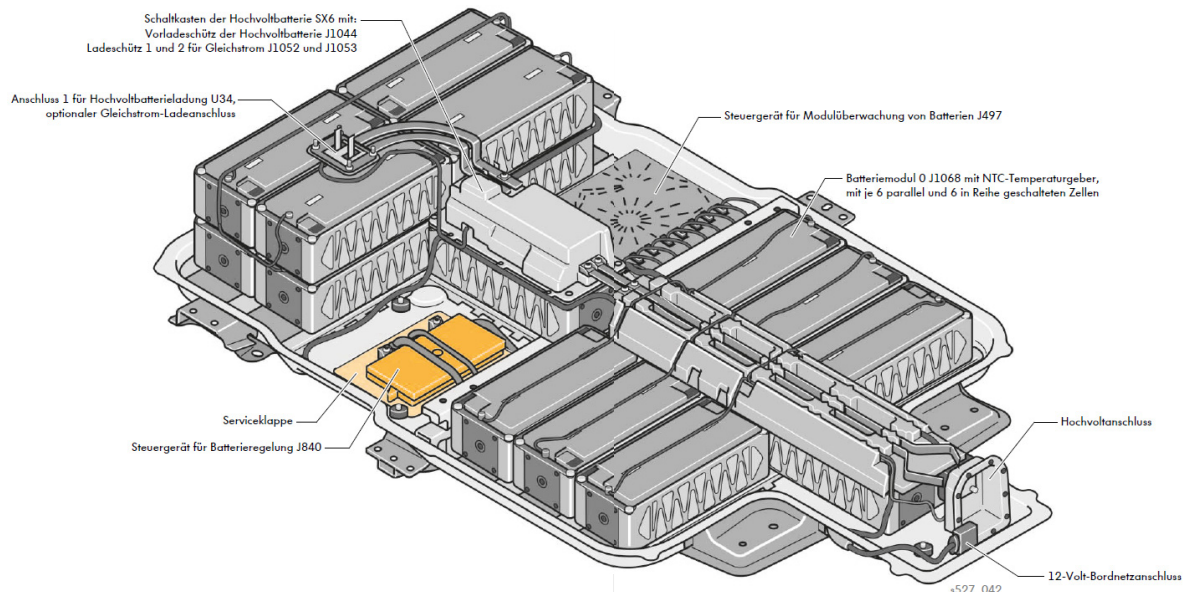
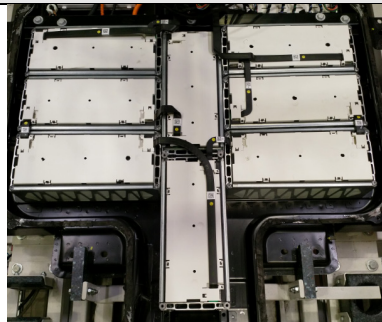



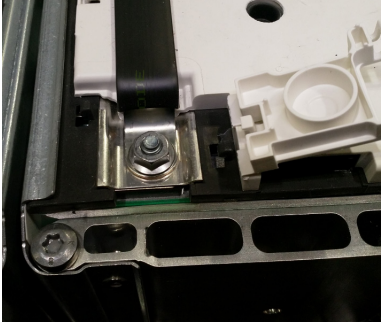
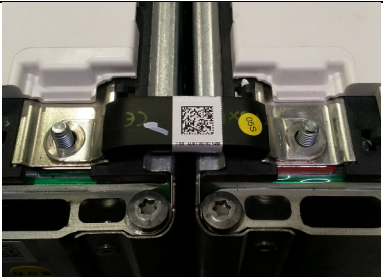

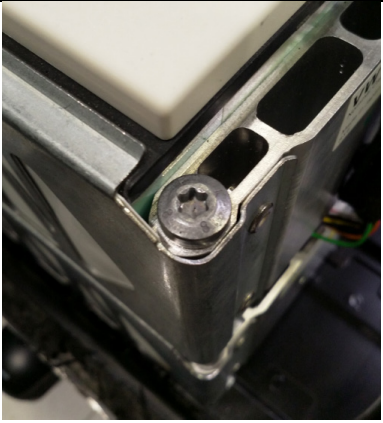
Abbildung 4.35: Schematische Traktionsbatterie VW e-up! (MJ 2014) [309]

Da die Entscheidungsprozesse des RCP nur bei einer größeren Menge an Produkten durchgeführt werden können, soll hier lediglich die exemplarische Zusammensetzung beschrieben werden und es wird die Annahme getroffen, dass die Moduldemontage das Ergebnis des Entscheidungsvorgangs auf Ebene des Gesamtproduktes darstellt (eine gesonderte Evaluation des Entscheidungsmoduls auf Basis der Daten von 1200 generischen Batterien findet sich in Kapitel 5).

Die Demontageoperationsplanung für ein Modul im Rahmen der prototypischen Umsetzung wird in sechs Schritten durchgeführt, die in Tabelle 4.15 dargestellt sind. Die Ausführbarkeit gilt dabei nur im Rahmen dieses Prototyps (einige Operationen kann auch ein Roboter durchführen, wenn ein Werkzeugwechsel möglich ist). Das System bestimmt die Sequenz auf Grundlage des für das Beispielprodukt zur Verfügung gestellten Informationsmodells und die Moduldemontage ist ein Operationsbaustein, der am physischen Prototypen ausgeführt werden soll. Da es praktische Unterschiede abhängig vom Verbauort der Module gibt, soll hier vom häufigsten Fall, dem freiliegenden Modul, ausgegangen werden. Die verwendete Batterie wurde für die Demontage im Prototypen vollständig entladen und es wurde der verklebte Gehäusedeckel entfernt. Eine Evaluation der Gesamtplanung findet sich in Abschnitt 5.3. Die Betrachtung der Moduldemontage wird in einer Potenzialanalyse von *Natkunarajah* [310] als technisch umsetzbar und notwendig bewertet und damit als ein möglicher Fokus im Bereich der Batteriendemontage festgelegt.

Tabelle 4.15: Operationsplan für die exemplarische Demontage der Komponente "Batteriemodul"

Schritt	Beschreibung Aktion	Bild	Werkzeug	Ausführend
0	Ausgangslage, Abdeckung Mittelteil und Hochvoltabgang bereits demontiert, Einzelmodule zugänglich		-	-

1	Abdeckungen der Kontaktverschraubungen öffnen		Schraubendreher für Clip	manuell
2	Kontaktschrauben entfernen		Außen-sechskant SW 10	Roboter oder manuell
3	Stromschienen an den Übergängen zu anderen Batteriemodulen entnehmen		Greifer	Roboter oder manuell
4	Abdeckung entfernen		Sauggreifer	Roboter oder manuell
5	Modulverschraubung lösen		Innensechsrund TX 30	Roboter oder manuell

6	Batteriemodul entnehmen		-	manuell aufgrund der maximal zulässigen Traglast des Roboters
---	-------------------------	--	---	---

Um diese Moduldemontage in einer praktischen Implementierung des Demontagekonzeptes ausführen zu können, wurde am *Institut für Produktionstechnik (IPT)* der Ostfalia Hochschule ein Prototyp gebaut, der alle Module des vorgestellten Systems beinhaltet. In Abbildung 4.36 ist der Versuchsträger abgebildet.

Kernelement der Anwendung ist der Leichtbauroboter *KUKA LBR iiwa 14 R820*, ein mit sieben Achsen besonders beweglicher kollaborativer Roboterarm mit einer maximalen Traglast von 14 kg und einer internen Kraft-/Momentensorik. Weiterhin gehört zur DEU ein über den MQTT-Standard in das Informationsmanagement einbindbares Schraubwerkzeug auf Basis des *Bosch Professional GSR 12V-35 FC* und einem *ESP8266* Mikrocontroller sowie einem additiv gefertigten Gehäuse. Das HMI wird im Rahmen der Anwendung über ein *Amazon Echo Show 8* realisiert, um sowohl eine Eingabebedienung über die Web-App als auch eine Sprachsteuerung mittels *Alexa-Client* zu ermöglichen. Die Applikation sowie der MQTT-Server werden über ein *Raspberry Pi 4 Model B 4 GB* gehostet. Die SPU wird hardwareseitig durch eine spezifisch entwickelte Stereovision-Kamera mit *Sony IMX 577* Sensoren realisiert, die vertikal über dem Arbeitsbereich montiert sind. Hinzu kommen im Rahmen der Kollisionsvermeidung ein weiterer Sensor zur Zellenüberwachung sowie eine am Werkzeugflansch montierte *Intel Real-sense D435i Kamera*. Das Backend der SPU wird durch einen *Nvidia Jetson Xavier 32 GB* realisiert, der im Systemkonzept ebenfalls die Aufgaben des RCP übernimmt, da er aufgrund der hohen parallelen Rechenleistung optimal für die anfallenden KI-Anwendungen (Bilderkennung und Entscheidungsprozessor) geeignet ist. Als Netzwerkknoten für den Prototyp wird ein *FritzBox 4040* Router verwendet, der gleichzeitig eine Verbindung mit dem Internet und damit zum dezentralen Informationsmarktplatz ermöglicht, um die Anwendung von der Maschinenebene bis zur kreislaufwirtschaftlichen Leitebene zu verbinden.

Die Verknüpfung der kommunizierenden Elemente der Systemmodule und die verwendeten Protokolle wurde wie in Abbildung 4.31 für die Prototypenhardware abgebildet aufgebaut. Der dezentrale Informationsserver, über den das OPC-UA Datenmodell für das Gesamtprodukt zu Beginn bezogen wurde befindet sich als angrenzendes Teilprojekt aus *Recycling 4.0* am *Institut für Software und Systems Engineering (ISSE)* der TU Clausthal und wird über eine REST²³-Schnittstelle über das Internet abgerufen.

²³ REST = **R**epresentational **S**tate **T**ransfer



Abbildung 4.36: Konceptdemonstrator als Prototyp

RCP

Die Umsetzung des RCP erfolgt im Prototypen vor allem als Verarbeitungsmodul für das Informationsmodell und die Entscheidung bezüglich der Verwertungsoption. Da der Prototyp nur einen Operationsschritt nachbildet, ist eine umfassende Sequenzplanung in der Anlage nicht vorgesehen, wird aber am Beispiel der Batteriemoduldemontage in Kapitel 5 in Bezug auf Berechnungserfolg und erforderliche Kapazitäten evaluiert. Das dafür erforderliche Strukturmodell wird in diesem Abschnitt beschrieben.

Hardwareseitig wird das RCP auf einem *Jetson Xavier* Modul von *Nvidia* implementiert [311]. Dieses monolithische System verfügt über einen *ARM* 64-bit Hauptprozessor und eine Grafikeinheit mit 512 Rechenkernen, die für Tensoroperationen optimiert sind. Die Produktinformationen erhält das RCP über eine TCP-Verbindung mit dem OPC-UA Protokoll von einem externen Server. Über die 16 Lanes der CSI-2 Schnittstelle werden ebenfalls die Kameras des Stereovision-Systems der SPU angesteuert, sowie der Detektionsalgorithmus auf dem Xavier ausgeführt. Die Implementierung beider Systemagenten auf einem Hardwarebaustein reduziert Latenzen der Datenübertragung und Investitionskosten. Durch die sequenzielle Ausführung sind keine Beeinträchtigungen der Performance messbar. Beide Module sind softwareseitig eigenständig und können prinzipiell auf beliebig verteilter Hardware umgesetzt werden. Mit einer Leistungsaufnahme von ca. 30 W unter Last stellt das *Jetson Xavier Developer Kit* eine effiziente Architektur für die Umsetzung bereit, ist jedoch nicht entsprechend den für die Industrie üblichen Schutzklassen gegen äußere Einflüsse geschützt.

Für die Synthese und Verarbeitung des digitalen Informationsmodells der Batterie wird im Prototypen das OPC-UA SDK von *Prosys* verwendet. Dieses unterstützt alle notwendigen OPC-UA Funktionalitäten sowie die Umsetzung der Companion-Spezifikationen, insbesondere VDMA 40010-1 [299]. Weiterhin stehen Bibliotheken für Java zur Verfügung, was erforderlich ist, da die Robotersteuerung nur mit Java programmierbar ist. Das SDK bietet den Vorteil, dass der erforderliche Programmcode anhand der Struktur des Informationsmodells automatisch generiert werden kann. Verwendet wird eine kostenlose Lizenz, in der die Laufzeit des OPC-Servers auf 120 Minuten beschränkt ist (nach einem Neustart ist das System wieder verfügbar). Die in Abbildung 4.37 dargestellten Umsetzungsbeispiele zeigen die Paketstruktur der OPC UA Implementierung im Prototypen. Die *credentials* beinhalten den für Autorisierung und Anmeldung erforderlichen Code, in *generated* befindet sich der über das SDK erzeugte spezifische Quellcode der Anwendungen. In der RCP-Umsetzung ist es das Paket *server*, welches die Methoden zum Datenhandling und die Methoden aus dem Informationsmodell enthält. Soll das System als Client mit einem anderen Server interagieren, befindet sich der Quellcode dafür im Paket *clients*.

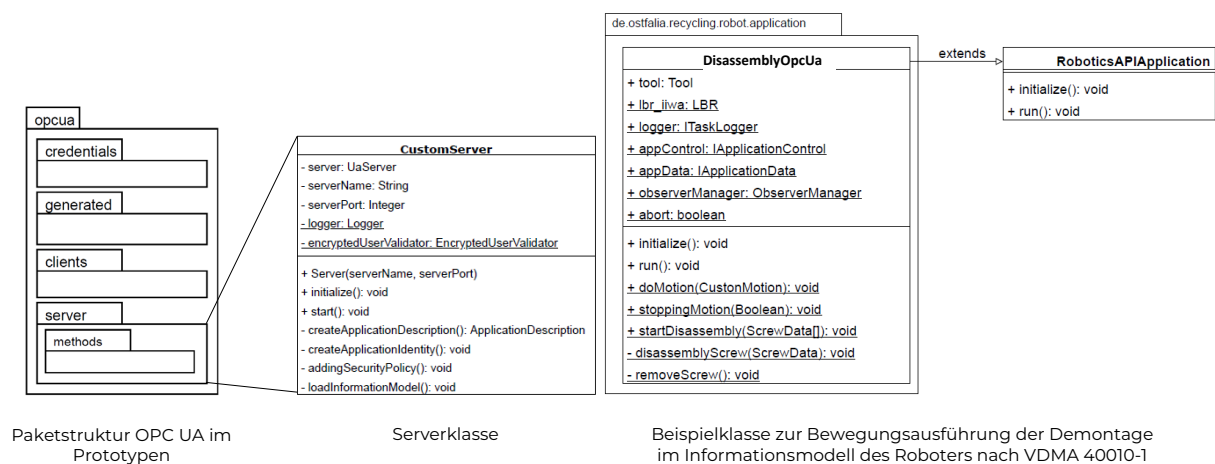


Abbildung 4.37: Umsetzungsbeispiele OPC-Informationsstruktur im Prototypen

Als zentrale Klasse wird der *CustomServer* erstellt, die alle erforderlichen Attribute für eine sichere Systemkommunikation enthält. Neben dem Namen der Verbindung und dem Port für die spätere Erreichbarkeit wird ebenfalls die Verschlüsselungsmethode für die Anmeldeinformation festgelegt. Die *initialize()*-Methode generiert die Anwendungsidentität und die notwendigen Zertifikate (Basic-SHA 256 Bit Verschlüsselung). Die Methode *loadInformationModel()* stellt die Lebenszyklusdaten bereit.

Das Informationsmodell des Roboters wurde mit Hilfe des Tools *UAModeler* entworfen und enthält alle Komponenten, die für die Abbildung nach der Spezifikation VDMA 40010-1 benötigt werden. In Abbildung 4.37, rechts, ist eine Beispielklasse *DisassemblyOpcUa* abgebildet, die die Bewegungsausführung des Roboters bei der Demontage beschreibt und die Hintergrundanwendung *RoboticsAPIApplication* des Roboters zur Kommunikation mit dem RCP-Server erweitert. Die Methodenaufrufe dieser Klasse werden direkt aus dem HMI heraus angesteuert. Das digitale Abbild des Roboters wird auf dem Server zur Verfügung gestellt und zyklisch in einem Zeitintervall von 500 Millisekunden aktualisiert. Auf diese Weise können über den RCP auch Prozessinformationen der Demontage, bis hin zu vollständigen Ablaufplänen gespeichert und an die externe Datenbasis zurückgegeben werden.

Die Informationsmodelle der Komponenten werden für den Entscheidungsprozessor auf Grundlage von drei unterschiedlichen Batteriemodellen angelegt. Die Datensätze werden im Prototypen von einem dezentralen Marktplatz gegen ein virtuelles Token erworben, was die Handelsprozesse auf dem Datenmarktplatz simulieren soll (vgl. [195]). Insgesamt wird das Informationsmodell für den Prototyp nur auf Ebene der Gesamtbatterie vollständig abgebildet. Hierbei kommen drei verschiedene generische Batteriemodelle mit Lithium-NMC Zellen zum Einsatz, die sich in ihrer Zusammensetzung an den Daten aus dem Forschungsprojekt *Lithorec II* orientieren [312, 313]. Die unterschiedlichen Batterietypen sind in Tabelle 4.16 dargestellt. Anteile von Kühlflüssigkeiten aktiver Systeme (PHEV) wurden bereits abgezogen.

Tabelle 4.16: Generische Beispielbatterien als Prototyp im Informationsmodell

Typbezeichnung	Gewicht [kg]	Zusammensetzung [%]	
Mittelklassewagen (medium BEV, Durchschnittswert nach [306]) [Bat_TypeA]	325,1	Aluminium: 34,5 Stahl: 9 Kunststoff [PA/PP]: 11 Sauerstoff: 4,8 Kobalt: 3,1 Nickel: 3,1	Mangan: 2,8 Lithium: 1 Kupfer: 11,5 Graphit: 8,2 Elektrolyt: 8,3 Verschiedenes: 2,7
Kleinwagen (small BEV, vgl. <i>e-up!</i>) [Bat_TypeB]	230	Aluminium: 32 Stahl: 11 Kunststoff [PA/PP]: 8 Sauerstoff: 4 Kobalt: 3,2 Nickel: 3,2	Mangan: 2,9 Lithium: 1,5 Kupfer: 12 Graphit: 9 Elektrolyt: 8,1 Verschiedenes: 2,7
Hybridfahrzeug (PHEV, vgl. <i>Audi A3 e-tron</i>) [Bat_TypeC]	125	Aluminium: 32,5 Stahl: 8 Kunststoff [PA/PP]: 10 Sauerstoff: 3,8 Kobalt: 3 Nickel: 3,3	Mangan: 3 Lithium: 1,3 Kupfer: 13,2 Graphit: 9,5 Elektrolyt: 7,8 Verschiedenes: 1,6

Auf Basis der generischen Batterietypen wurden Informationsmodelle für 1200 Beispielbatterien generiert. Die individuellen Werte (vgl. Tabelle 4.5) für Materialpreise, Prozessdaten wie der Demontagezeit und Lebenszyklusdaten wurden für jedes Beispiel individuell in einem normalverteilten, für jedes Feature festgelegten Wertebereich zufällig generiert. Die Klassifizierung der Trainingsdaten hinsichtlich der EoL-Option erfolgt manuell anhand einer Einschätzung der Eignung zur Wiederverwendung/Aufbereitung bzw. zum Recycling auf Grundlage der Daten. Dieser Datensatz lässt sich in beliebigen Auflösungen erweitern. Beispielsweise beinhaltet allein das BMS des *e-up!* 18 Funktionsparameter, von denen hier jedoch nur der SoH exemplarisch aufgenommen wurde. Um die Datensätze für die Verarbeitung durch den Entscheidungsprozessor möglichst kompakt darzustellen, wird ein umfassendes Preprocessing durchgeführt. Hierfür sind in einem Schritt die jeweiligen Massen der einzelnen Materialien aus dem tatsächlichen Gewicht und den Materialanteilen zu berechnen, womit in einem zweiten Schritt die Rohstoffpreise zur Bildung eines hypothetischen Materialpreisindikators verwendet werden (der tatsächlich zu erzielende Materialpreis für Sekundärrohstoffe aus dem stofflichen Recycling hängt maßgeblich von den nachgelagerten Prozessen ab und wird hier nur durch den Demontagegrad der jeweiligen Hierarchiestufe angenähert, siehe 4.3.1). Des Weiteren werden Features aus dem Informationsmodell, die ausschließlich Strukturinformationen enthalten (z. B. die Knoten-ID), im Preprocessing gelöscht. Abschließend erfolgt eine Skalierung der Werte durch Normalisierung.

Als Entscheidungsprozessor wird im Prototypen die in Kapitel 4.3.1 beschriebene Architektur des voll verbundenen NN verwendet. Die Hyperparameter der Netzoptimierung sind in der Entwicklung bereits anhand des generischen Batteriedatensatzes abgestimmt worden, sodass für die prototypische Implementierung keine weiteren Anpassungen erforderlich sind. Das initiale Training erfolgt auf einer externen Workstation, die finale Anwendung wird dann mit einer Trainingsschleife als Lernelement auf dem *Jetson Xavier* umgesetzt. Für den Lernprozess kann festgelegt werden, nach wie vielen Entscheidungsprozessen (Inferenzen des NN) ein neuer Batch zur weiteren Gewichtung der Modellneuronen trainiert werden soll. Da es möglich ist, die RCP-Entscheidungen im HMI zu übersteuern, können so iterative Anpassungen an der Entscheidungsmetrik vorgenommen werden, was die Reaktion auf veränderte Bedingungen im Umfeld des Demontagebetriebes zulässt. Der Einbezug von zusätzlichen Daten aus der externen Informationsplattform ist ebenfalls möglich. Das Entscheidungsmodul wird prototypisch für die Fallstudie der Moduldemontage entworfen, jedoch nicht für jedes Modul der Batterie in dem Demonstrator implementiert, da hierfür keine Datensätze zur Erstellung von Trainings-Sets auf Modulebene mangels technischer Informationen und verlässlicher Quellen erstellt werden konnten. Das Prinzip der produktindividuellen Entscheidung wird daher nur auf Ebene von Gesamtbatterien im Prototyp umgesetzt und evaluiert.

Das Strukturmodell für die Sequenzplanung wird im Prototyp auf der Ebene der Operationen modelliert. Betrachtet wird der ohne Verschiebung des Roboters erreichbare Arbeitsraum und die darin auftretenden Komponenten. Der Teil des Gesamtproduktes, der für die Sequenzplanung abgebildet wird, ist in Abbildung 4.38 dargestellt. Es handelt sich dabei um den vorderen Teil der Batterie mit insgesamt acht Modulen (Kennbuchstabe A-H) sowie einigen Peripheriebauteilen (I-M), die gemäß den Vorrangrelationen vor der eigentlichen Moduldemontage abgebaut werden müssen. Die Verwertungsentscheidungen und Wertfunktionen (Gleichung 10) werden für das Beispiel des Prototyps im Informationsmodell festgelegt, wobei die Ergebnisse des Entscheidungsprozessors manuell eingetragen werden, da für die jeweiligen Module nicht ausreichend Daten verfügbar sind. Ein vollständiges AND/OR-Diagramm ist in der Abbildung aus Platzgründen nicht dargestellt. Die Demontagematrix wird analog des in Abbildung 4.14 gezeigten Beispiels erstellt.

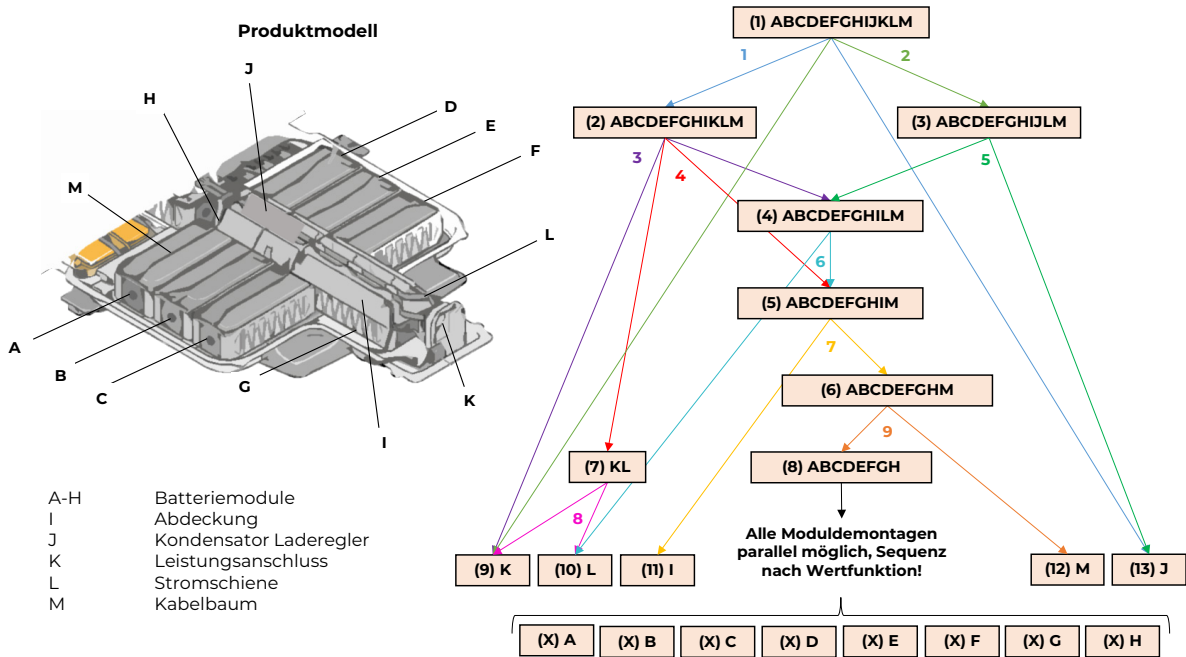


Abbildung 4.38: AND/OR-Graph (gekürzt) mit Vorrangrelationen für die Moduldemontage

Für die Sequenzplanung in einer diskreten Struktur in Form eines AND/OR-Graphen kann in Abhängigkeit der Bauteile (Anzahl n) die maximale Anzahl an Knoten (Menge A) mit Gleichung 17 berechnet werden [233].

$$A = 2^n - 1 \quad (17)$$

Diese Menge entspricht der Mächtigkeit der Potenzmenge einer n -elementigen Menge abzüglich dem Fall der leeren Menge, deren Auftreten in der Demontage nicht vorkommen kann, da die realen Bauteile das System im Prozess nicht verlassen²⁴. Der Fall, dass die vollständige Mächtigkeit von A auftritt erfordert die Parallelität aller Operationen ohne Einschränkung von Vorrangrelationen, sodass hier in der Praxis nur 13 Knoten im gekürzten Vorranggraphen existieren. Für die eigentliche Demontage der Module, also der Baugruppe (8), trifft dieser Fall hingegen wieder zu, da die Reihenfolge nicht eingeschränkt ist. Hier kann es theoretisch 255 Baugruppen-Kombinationen (Knoten) und $n! = 40320$ Operationen (Kanten) geben. Dieser Lösungsraum kann bereits mit einer Demontage-Matrix als Inzidenzmatrix erheblich auf die möglichen Lösungen unter der Bedingung der physischen Einmaligkeit von Kombinationen und Operationen reduziert werden [232]. Praktisch wird die Planung hier weiter vereinfacht, indem im Falle vollständiger Parallelität ab einer Hierarchieebene eine Bestimmung der Sequenz ausschließlich auf Grundlage der EoL-Option und dem erreichbaren Demontageergebnis aus dem Informationsmodell geplant wird. Damit wird der scheinbare Nachteil der hohen Varianz paralleler Strukturen im Modell zum Vorteil genutzt, da hier von der Evaluation auf Basis der vollständigen Matrix abgesehen werden kann, sodass durch das eindimensionale Ranking (Umsetzung als Liste oder Array) sogar eine Verkürzung der Berechnungszeiten folgt.

Die Operationsfolge der bestimmten Sequenz wird dann aus dem RCP an die DEU weitergegeben und der Demontagebefehl kann roboterseitig umgesetzt werden.

²⁴ Es wäre technisch möglich, die Systemgrenzen so zu definieren, dass eine Operation innerhalb der Demontage-Szene als Ergebnis das scheinbare Verschwinden der Komponenten hätte, was jedoch praktisch sinnlos ist.

SPU

Die Implementierung der SPU im Prototypen erfolgt durch die Kopplung von unterschiedlichen Kamerasystemen zur Erfüllung der in 4.3.2 beschriebenen Modulfunktionen (Identifikation, Detektion, Bewertung und Arbeitsraumüberwachung). In Abbildung 4.39 werden die beiden Haupt-Bildverarbeitungsströme dargestellt. Es erfolgt hierbei eine Trennung zwischen den Funktionen der bauteilbezogenen Identifikation, Detektion und Bewertung sowie der für die MRK wichtigen Arbeitsraumüberwachung. Für die Identifikation und Detektion wird eine Stereovision-Kamera eingesetzt, die mit einem *Faster R-CNN Inception ResNet V2* Netzwerk zur Objekterkennung betrieben wird. Komponenten und Verbinder werden dabei als Klassen in einem Transfer-Learning Prozess trainiert, wobei im Rahmen des Demonstrators ein besonderer Fokus auf den Verbindungselementen liegt, da diese aufgrund ihrer geringen Größe und der Ähnlichkeit zueinander den höchsten Schwierigkeitsgrad innerhalb der Anwendung darstellen. Die Sony IMX 577 Bildsensoren sind an zentraler Position vertikal über dem Montageobjekt montiert. Für die Arbeitsraumüberwachung wird an der Flanschkamera ein *Skeleton-Tracking* mittels dem *Detectron 2* Netzwerk implementiert, welches eine hohe Verlässlichkeit bei der Menschenkennung bietet (siehe Abbildung 4.39, unten rechts). Um die Sicherheitskriterien des Demonstrators weiter zu verbessern, wurden ebenfalls in einem Transfer-Learning zusätzliche Keypoints von Fingergelenken trainiert. Ein Training für typische Handwerkzeuge wurde hingegen nicht vorgenommen, da der Labeling-Aufwand die verhältnismäßig geringe Verbesserung nicht rechtfertigen würde. Die dritte Sony-Kamera kann ebenfalls zur Arbeitsraumüberwachung, sowohl für das Execution Monitoring als auch für die Sicherheitsanwendung, eingesetzt werden.

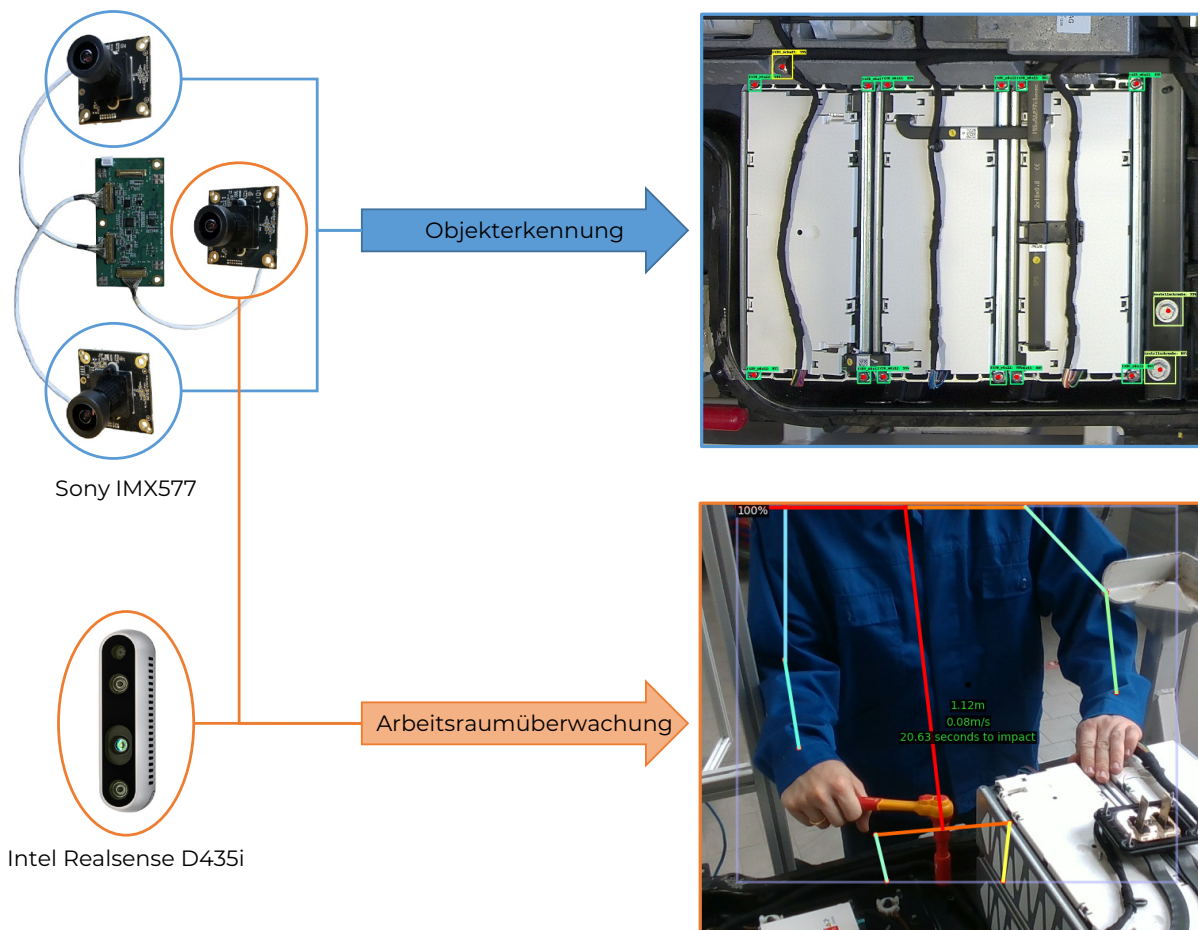


Abbildung 4.39: Funktionsimplementierung der SPU am Prototypen, jeweils mit Beispiel-RoI

Der Trainingsprozess für die Bilderkennung wird mit der *Tensorflow Object Detection API* ausgeführt. *Tensorflow* ist ein plattformunabhängiges Open-Source-Framework für KI-Entwicklung [314]. Durch seine weite Verbreitung ist Tensorflow gut geeignet um skalierbare KI-Projekte zu entwickeln, die auf unterschiedlichen Endgeräten verwendet werden können. Die Berechnungen des Trainings werden über die *Compute Unified Device Architecture* (CUDA) von *Nvidia* auf der GPU ausgeführt, was die Berechnungszeit durch Parallelisierung der Operationen erheblich verkürzt. Das Trainingsprogramm der API muss mittels einer Konfigurationsdatei parametrisiert werden, in der die Anzahl der Klassen, die Kernel-size, der Stride, Dropout, NMS-Parameter (entfernen der Boxen mit geringer Übereinstimmung), Batchgröße, Data-Augmentation, Lernrate und Schrittzahl vorgegeben werden. Die Data-Augmentation für das Training der Bilderkennung arbeitet hier mit horizontaler und vertikaler Spiegelung sowie Drehungen um 90°. Eine spezifische Optimierung der Hyperparameter für die Bilderkennung wird nicht vorgenommen (Default-Werte entsprechen bereits den Werten für die Genauigkeitsangaben, siehe 4.3.2). Da es sich bei der verwendeten Methode um *Transfer-Learning* handelt, wird ein Basismodell benötigt²⁵. Das Training der Bilderkennung wird auf einer aktuellen Workstation mit *AMD Ryzen 3950X* Prozessor (16 Kerne), 64 GB Arbeitsspeicher und einer *Nvidia RTX 2080ti* Grafikkarte unter *Ubuntu 18.04 LTS* durchgeführt. Allein der Trainingsprozess für die Verbindungselemente erfordert in dieser Systemkonfiguration eine Berechnungszeit von 32 Stunden und 25 Minuten.

Im Betrieb werden mehrere Modelle parallel aufgerufen. Die Bilderkennung und Bewertung erfolgt dabei schrittweise, wobei zu Beginn der Demontage eine Gesamtübersicht des Demontageobjektes aufgenommen wird. Die Arbeitsraumüberwachung läuft kontinuierlich ab und ist mit einem Hintergrundtask des KUKA-Roboters synchronisiert (siehe Prototyp DEU). Um die Ausführungsüberwachung zu updaten, kann nach einzelnen Operationen einer Sequenz eine erneute Detektion für eine spezifische Bild-RoI ausgeführt werden. Eine vollständige Überprüfung der Gesamtszene ist aufgrund der hohen Berechnungszeiten und dem erhöhten Fehlerpotenzial bei Mehrfachberechnung in dem Prototyp nicht empfehlenswert, sollte jedoch bei einer industriellen Implementierung angestrebt werden. Die Validierung der Bilderkennung, insbesondere der Genauigkeit, wird in Kapitel 5 im Detail betrachtet.

Die Bewertung der Komponenten durch die SPU erfolgt im Prototypen durch zwei Qualitätsmerkmale, Korrosion und Vollständigkeitsprüfung. Da durch das Informationsmodell und die Bauteilerkennung bereits alle Informationen für eine Vollständigkeitsprüfung vorliegen, muss nur die Korrosionserkennung als DL-Ansatz zusätzlich implementiert werden. Hierfür wird anhand von 70 öffentlich verfügbaren Bildern mit Korrosion (Google-Suche) mit Hilfe der oben genannten Data-Augmentation Methoden eine zusätzliche Korrosionsklasse eintrainiert. Diese Menge ist deutlich geringer als in spezifischen Untersuchungen zur Korrosionserkennung, für den Demonstrator des Demontagekonzeptes jedoch ausreichend, da der Objektbereich für ein einziges Beispielprodukt deutlich geringer ist als bei einer flexiblen Anwendung für eine industrielle Implementierung. Bei der Bewertung, ob ein Bauteil korrodiert ist, wird festgestellt, ob eine Überschneidung der Bauteil-Bounding-Box und der Korrosions-Bounding-Box zu mehr als 40% vorliegt. Ist dies der Fall gilt das Bauteil als rostig. Da es nur zwei Beschädigungsmöglichkeiten gibt, ist Q_{OPT} entweder bei 100%, 50% oder 0%. Eine weitere Zustandsprüfung, die bei Batteriemodulen angewendet werden kann, ist eine optische Expansionsprüfung zur Feststellung von Beschädigungen der Zellen. Diese wird allerdings im Prototypen aufgrund der schwierigen Umsetzbarkeit mit der vorhandenen Hardware und dem hohen Gefahrenpotenzial im Umgang mit beschädigten Zellen nicht eingesetzt.

²⁵ Hier: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/detection_model_zoo.md. Zugriff am: 23. März 2020.

DEU

Robotersystem, Werkzeugmodul und Bedieneinheit werden im DEU-Prototypen umgesetzt. Der Prototyp der Ausführungseinheit soll die in Tabelle 4.15 dargestellte Beispieloperation unterstützen. Der *KUKA LBR iiwa* mit dem informationsintegrierten Schraubwerkzeug soll dabei als wichtigste Aktionsfolge den Schritt 5 der Operationsplanung, das Entfernen der Modulschrauben, und damit die Vorbereitung für die Modulentnahme übernehmen. Die Handhabung von Komponenten und Verbindern wird als ausschließlich manuell festgelegt, da kein Wechselsystem für Greifer vorhanden ist und das Limit der Gewichtsbelastung des Roboterarms (14 kg abzüglich ca. 3 kg Greifer, z. B. *Schunk PGN* und ca. 2 kg Wechselsystem mit Peripherie und Durchführung) eine Handhabung der Batteriemodule (9,4 kg) nicht zulässt (auch in Bezug auf die Sicherheitsbestimmungen einer MRK-Anwendung).

Die Operationsbeschreibung im Situationskalkül ist in Abbildung 4.40 dargestellt und wird innerhalb der *KUKA Sunrise OS* Steuerung des Roboters in der Programmiersprache *Java* implementiert. Nach einer Operationsanforderung aus dem RCP wird die Bestimmung des Ausgangszustandes über eine Abfrage der Sensordaten aus der SPU abgeschlossen. Das Ziel der Operation, die Demontage des Moduls, wird vorgegeben und aufgrund dessen und der Beschreibung der Ausgangslage können die erforderlichen Aktionsprädikate festgelegt werden. Der Buchstabe Y ist bei dem Aktionsprädikat zur SELECT-Aktion als Platzhalter für die Verbindungselemente eingesetzt. Hierbei werden für jedes Verbindungselement einzeln die verfügbaren Informationen geprüft, um im Fall einer negativen Demontierbarkeit (z. B. durch Beschädigung, siehe Tabelle 4.13) einen manuellen Arbeitsschritt einzuleiten.

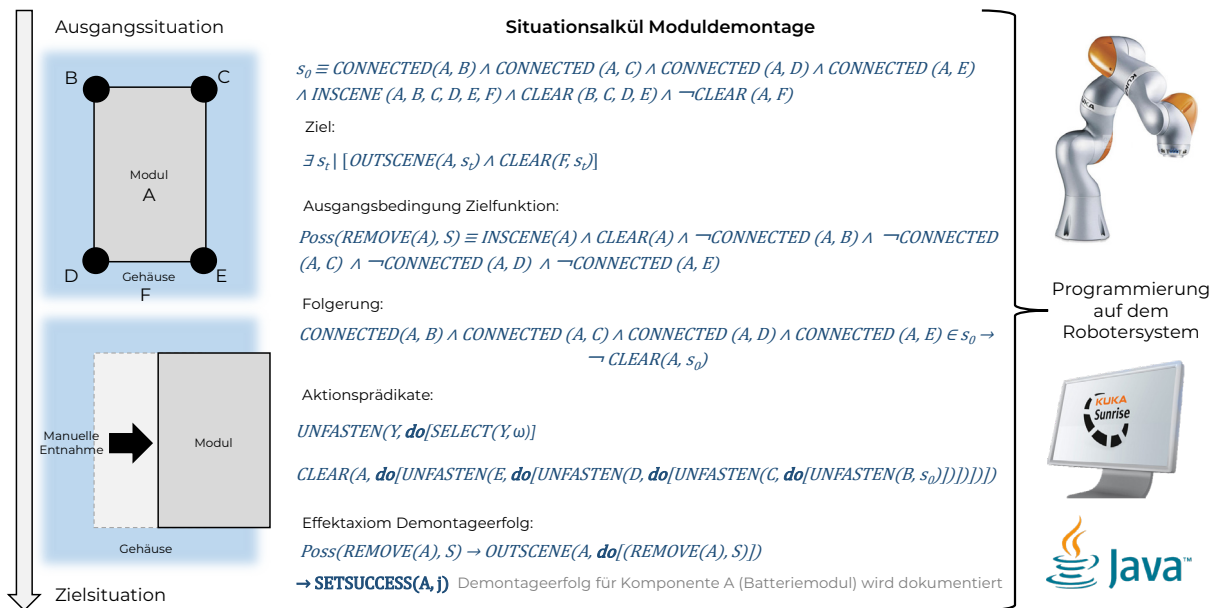


Abbildung 4.40: Ablaufbeschreibung Beispieloperation Moduldemontage

Eine praktische Herausforderung dieser Operation im Demonstrator stellt die Erreichbarkeit der Schrauben dar, die nicht für jedes Modul der Batterie gegeben ist. Trotz der sieben Achsen des Roboters ist es nicht möglich, innerhalb des Arbeitsraumes das Werkzeug so auszurichten, dass alle Punkte der Batterie problemlos erreicht werden können. Da die exemplarische Demontage für jedes Modul prinzipiell gleich abläuft, ist es ausreichend, die Operation an einem Modul durchzuführen. Um alle Module zu demonstrieren, kann der Roboter auf einer Linearachse montiert werden. Diese Konfiguration wurde in einer Simulationsstudie in *Siemens Technomatix Process Simulate* untersucht, jedoch aufgrund der hohen Kosten und der prinzipiellen Redundanz für den Konzeptnachweis nicht umgesetzt (vgl. Abbildung 4.41).

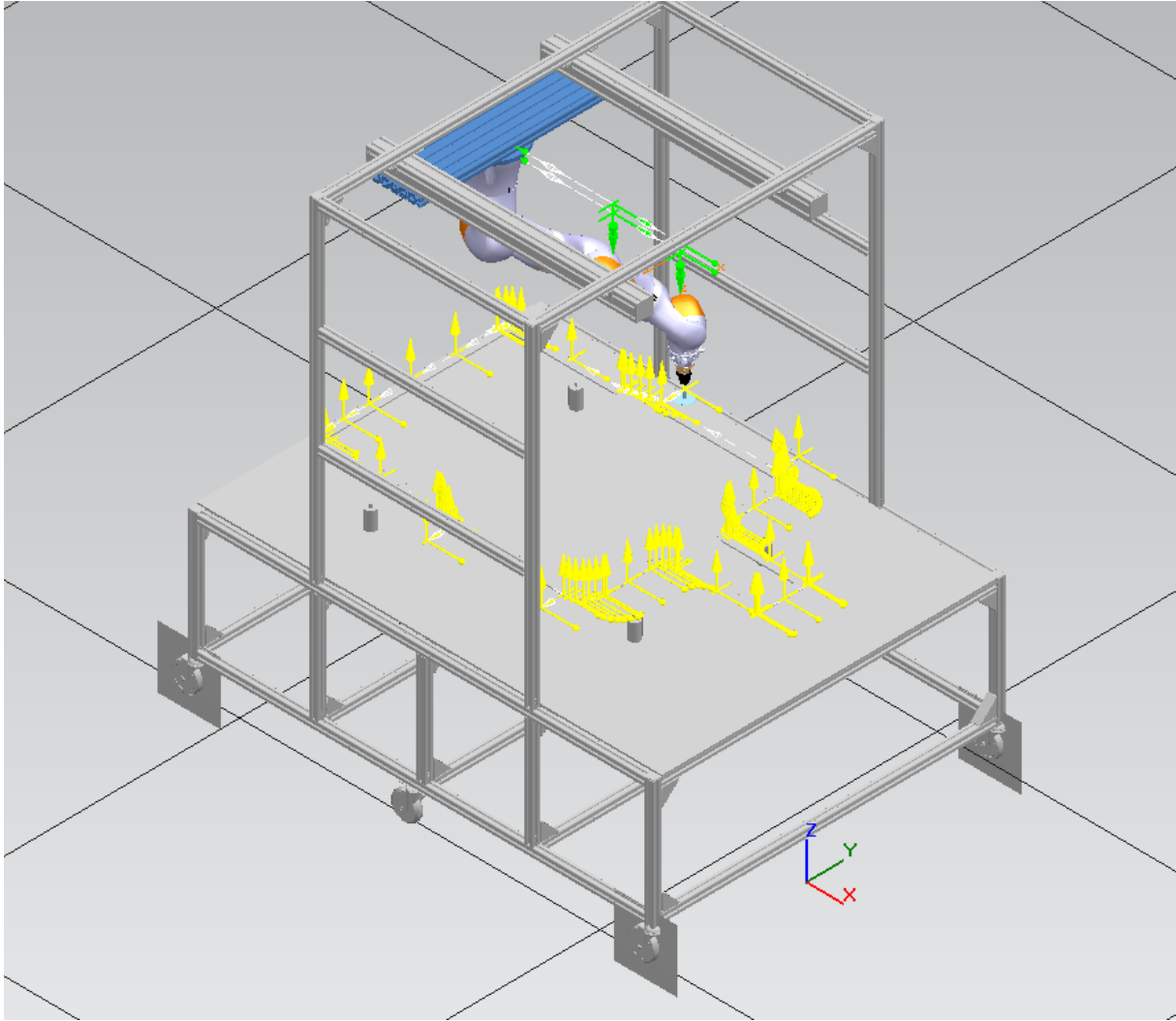


Abbildung 4.41: Simulation der Zugänglichkeit der äußeren Konturen der Batterie mit verfahrbarer Traverse

Für eine konkrete Bestimmung der Sicherheitsgrenzwerte gemäß ISO 15066 [260] muss wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben eine Evaluation anhand der anlagenspezifischen Kenngrößen durchgeführt werden. Es wird dabei ausschließlich der transiente Kontakt betrachtet. Quasistatische Klemmprozesse werden aufgrund des hohen praktischen Messaufwands in der Konzeptentwicklung vernachlässigt, müssten bei einer industriellen Anlage jedoch abgenommen werden. Durch die Arbeitsraumüberwachung der SPU sind die Koordinaten kollisionsrelevanter Körperstellen der Mitarbeitenden im Montageprozess bekannt und können berücksichtigt werden. Auf Basis der Koordinaten wird ein sicherheitsbewerteter, überwachter Halt als kontinuierlicher Prozess in der Robotersteuerung implementiert. Hierbei wird in einer zweistufigen Abfrage die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters angepasst: In der ersten Stufe erfolgt eine Reduzierung der Geschwindigkeit bei Unterschreitung des Sicherheitsabstandes. Wird der Abstand noch kleiner, kommt der Roboter zum Stehen.

Ausgehend von einer betriebsartbedingten Verfahrgeschwindigkeit von 250 mm/s ergibt sich aus Gleichung 18 ein erforderlicher Sicherheitsabstand von 569 mm für den Demonstrator.

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \quad (18)$$

Hierbei wurden die in Tabelle 4.17 beschriebenen Werte aus der Spezifikation und der Anleitung des Roboters [315, 316] übernommen oder anhand von Messungen der Systemreaktionen bestimmt.

Tabelle 4.17: Kenngrößen zur Bestimmung des Sicherheitsabstandes nach DIN ISO/TS 15066

Systemgröße	Beschreibung nach ISO 15066	Wert für den Prototypen
S_h	Anteil verursacht durch Positionsänderungen der Mitarbeitenden	402 mm mit 202 ms Reaktionszeit ²⁶ und 1 m/s Bewegung
S_r	Anteil verursacht durch Reaktionszeiten des Systems	100 mm mit 202 ms Reaktionszeit und 200 ms Haltezeit
S_s	Anteil verursacht durch den Anhalteweg des Roboters	64,8 mm mit 9,323° maximalem Halteweg
C	Eindringabstand im Sensorfeld	0, da kontinuierliche Erfassung des Arbeitsbereichs
Z_d	Positionsunsicherheit der Bedienperson	2 mm aus dem Kamerasystem
Z_r	Positionsunsicherheit des Robotersystems	0,15 mm

Unterhalb des Sicherheitsabstandes wird die Robotergeschwindigkeit gedrosselt, um die biomechanischen Grenzwerte im Stoßfall nicht zu überschreiten. Aus der effektiven Masse des Robotersystems und der kleinstmöglichen Kontaktfläche (0,5 cm², Schraubbit) ergibt sich aus der Applikation *KUKA HRC Guide* (Version 1.1) eine erforderliche Reduzierung auf eine Maximalgeschwindigkeit von 231 mm/s innerhalb des festgelegten Sicherheitsabstandes. Aufgrund der geringen Ausgangsgeschwindigkeit entspricht diese Reduzierung lediglich einer Verlangsamung um 7,6%. Praktisch wird daher eine Reduzierung auf 90% bei Unterschreitung des Abstandes festgelegt. Um Kollisionen gänzlich zu vermeiden, hält das System bei Abständen kleiner 200 mm vollständig an. Entfernt sich das Hindernis, setzt der Roboter seine Aktion unterbrechungsfrei fort.

Im Prototypen wird ein akkubetriebenes Schraubwerkzeug mit wechselbaren Bit-Aufsätzen eingesetzt, da Schrauben die häufigste Verbindungsart an der Batterie darstellen (siehe Abbildung 4.36). Das eingesetzte Werkzeug stellt eine Eigenkonstruktion dar, um im Rahmen der Anforderungen an die Informationsintegration eine Lösung zu schaffen, die in Bezug auf die eingesetzte Steuerungssoftware vollständig zugänglich ist. Das Werkzeug kann dabei aus dem Roboterprogramm heraus über das MQTT-Protokoll angesteuert werden. Durch die auf einem *ESP8266* Mikrocontroller realisierte Steuerung ist es möglich, den Ladestand auszulesen sowie mit Hilfe von Kennlinien die Schraubcharakteristik zu dokumentieren. Hierdurch kann ebenfalls eine Diagnostik der Schraubverbindung in Anlehnung an *Ap-ley et al.* [285] durchgeführt werden. Das Anfahren der Schrauben erfolgt auf Grundlage der Koordinaten der SPU und einem sensitiven Suchalgorithmus des Roboters. Für die Feinbestimmung der Schraubenposition wird ausgehend von der Zielkoordinate eine Sinusschwingung in der X-Y-Ebene mit einer Last auf der Z-Achse verwendet, um den Bit kraftsensitiv in die Schraube einzuführen. Alternativ kann auch in einer Spiralbewegung nach Vorbild von *Li et al.* [282] eine Feinpositionierung erfolgen.

Von einer Demontageoperation werden für jeden Arbeitsschritt die erforderlichen Prozesszeiten aufgenommen und im Informationsmodell hinterlegt. Im Rahmen der OPC-Spezifikation für Robotik [299] ist es weiterhin möglich, die vollständige Bewegung des Roboters im passenden Datenformat zu hinterlegen und bei Bedarf anderen Teilnehmern der Kreislaufwirtschaft bereitzustellen.

²⁶ Die Reaktionszeit des Systems setzt sich zusammen aus: Keypoint-Detection ca. 100 ms, Signalverarbeitung Programmdurchlauf KUKA Sunrise ca. 50 ms, Reaktionszeit Robotersystem ca. 30 ms, Netzwerkübertragung ca. 4 ms und einem Sicherheitszuschlag von 10%

Recycling 4.0

STARTSEITE
DEMONTAGE
HISTORIE
OPC UA DEMONTAGE
Q

OPC UA Demontage

🏠 > OPC UA Demontage

Entscheidungsmodul

NEUSTARTEN

Vision-Client:

Connected


NEUSTARTEN

Roboter-Client:


Connected

NEUSTARTEN


Anlagenstatus




Ready: Initialized



Ready



12.04 V



Ready

Fahrzeugdaten

FAHRZEUG ID	DEMONTAGEKOSTEN	ERWARTETER MARKTPREIS	DEMONTAGEZEIT	DEMONTIERTE SCHRAUBEN
<div> <div>Fahrzeug-Id: <input type="text"/></div> <div>ANGEBOT PRÜFEN</div> </div>				

Abbildung 4.42: Screenshot aus der Webapplikation des Prototypen-HMI

Das prototypisch implementierte HMI lässt in einer Web-Applikation die Anforderung der Informationen zum Produkt sowie den Start der Demontage zu. Eine nutzerzentrierte Menüführung erlaubt dabei die einfache und zielgerichtete Bedienung. In Abbildung 4.42 ist ein Screenshot aus der Webapplikation des HMI abgebildet. In einem zentralen Navigationsmenü kann neben einer Startseite mit allgemeinen Informationen ein individuelles Demontagemenü geöffnet werden, das den Betrieb auch ohne Verknüpfung zum dezentralen Informationssystem erlaubt. Über den Menüpunkt *Historie* können durch die Anwender vergangene Operationen, die vom System dokumentiert worden sind, wieder aufgerufen werden. Der Menüpunkt *OPC UA Demontage*, dessen Screenshot abgebildet ist, steuert die verknüpfte Demontageoperation auf Basis des Informationsmodells. Im zentralen Bereich wird auf der Startseite die Anlagenverfügbarkeit, visualisiert durch Statusinformationen zu den Systemagenten, dargestellt. Im Fall von technischen Problemen lassen sich hier auch die jeweiligen Module neu starten. Für den Fall der Batteriedemontage muss zuerst die VIN der zu demontierenden Batterie eingegeben werden. Nach einem Contracting-Prinzip wird der Informationsdatensatz mit einem virtuellen Token erworben und die Demontage der fahrzeugspezifischen Batterie wird begonnen (siehe [193]). Nach der Demontage werden die Prozessparameter *Kosten* und *Zeit* dokumentiert und es wird ebenfalls der aus dem Informationsdatensatz zu erwartende Marktpreis dargestellt sowie die Schrauben des Beispiels dokumentiert.

Neben der Möglichkeit der Bedienung über eine Webapplikation auf einem PC oder einem mobilen Endgerät ist es ebenfalls möglich, die MQTT Befehle, die über die Applikation an das System übertragen werden, auch per Sprachbefehl einzugeben. Dies soll die Bedienung im Rahmen der MRK vereinfachen und im idealen Prozessablauf längere Eingabezeiten minimieren.

5 Evaluation und Validierung

Um eine Einordnung des entwickelten Konzeptes im Kontext der bisherigen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Demontageautomatisierung zu erlauben, soll im folgenden Kapitel eine Evaluation hinsichtlich der Zielerreichung in Bezug auf die Anforderungen und eine Validierung der implementierten Funktionen erfolgen. Hierfür wird in Abschnitt 5.1 eine anforderungsbezogene Festlegung der zu prüfenden Merkmale und Systemeigenschaften vorgenommen, wobei die erforderlichen Aspekte zur Prüfung der in Kapitel 3 aufgestellten Forschungshypothesen bestimmt werden. Wie die festgelegten Kriterien evaluiert werden sollen, wird in Abschnitt 5.2 festgelegt. Praktische Experimente werden dabei an dem in Kapitel 4.5 beschriebenen Prototypen durchgeführt. Durch die detaillierte Beschreibung des Prototyps unter vollständiger Nennung der verwendeten Hardware und Software-Frameworks sind die Experimente grundsätzlich auf Basis dieser Arbeit reproduzierbar. Da in der Praxis kein optimales System für eine universelle, automatisierte Demontage existiert, ist eine quantifizierbare Approximation im Rahmen eines Benchmarks nicht möglich, sondern ausschließlich die Prüfung der festgelegten Zielkriterien. Darüber hinaus hat die Evaluation nicht den Anspruch eine allgemeine Lösung für die Batteriedemontage zu präsentieren. Die Batterie dient als Demontageobjekt der Konzeptvalidierung – die Erkenntnisse und das Konzept an sich können zwar als Grundlage für industrielle Demontageanlagen für Traktionsbatterien verwendet werden, haben aber keinen universellen praktischen Lösungsanspruch hierfür. Die Ergebnisse der Evaluationsexperimente werden im Kapitel 5.3 analysiert und differenziert nach qualitativen und quantitativen Ergebnisanteilen eingeordnet.

5.1 Bestimmung der Evaluationsgrößen

Der Gegenstand der Überprüfung in Form der Evaluationsgrößen kann aus den Forschungshypothesen und den daraus abgeleiteten Systemanforderungen aus Abschnitt 4.1 bestimmt werden. Die Fragestellungen werden dabei dem allgemeinen Informationsmanagement sowie der Performance der einzelnen Module des Gesamtkonzeptes zugeordnet. In Bezug auf die wissenschaftstheoretische Methodik der Gesamtuntersuchung stellt die Konzeptentwicklung aus Kapitel 4 und davon insbesondere die Beschreibung der prototypischen Demontageeinrichtung die Definition der Randbedingungen der Versuche dar.

Anhand der in Kapitel 3 festgelegten Einordnungen der Hypothesen nach Untersuchungsprinzipien ist die Betrachtung von H_1 , H_2 und $H_{2.1}$ aufgrund des Existenzquantors mittels empirisch nachweisbarer Umsetzung (Verifikationsprinzip) zu prüfen und die Hypothese H_3 aufgrund der Allquantor-Charakteristik mittels Falsifikationsprinzip, also mit einer fallbezogenen, quantitativen Untersuchung zu prüfen.

Für die Hypothese H_1 müssen die folgenden primären Fragestellungen betrachtet werden:

- Ist das Informationsmodell durchgängig und standardisiert?
- Können Produkt- und Prozessinformationen bidirektional ausgetauscht werden?

Hieraus lassen sich die in Tabelle 5.1 aufgeführten modulbezogenen Evaluationsgrößen und Sekundärfragestellungen ableiten. Die Punkte beziehen sich überwiegend auf die gemeinsame Ontologie und auf die Informationsstruktur, wobei vor allem Aspekte des Kommunikationskonzeptes zwischen den Systembestandteilen geprüft werden müssen. Diese folgen zum einen aus der Nachricht selbst, zum anderen aus dem Übertragungsmedium und den Netzwerkparametern. Die herstellerübergreifende Standardisierung ist bereits durch die Entwicklungsmethodik erfüllt, da bei der Gestaltung des OPC-UA Modells auf Grundlage technischer Normen vorgegangen wurde. Der Sonderfall unvollständiger Informationen muss ebenfalls überprüft werden, um das Konzept im Kontext der industriellen Eignung zu bewerten.

Tabelle 5.1: Evaluationsgrößen in Bezug auf Hypothese 1

Fragestellung	Zielmodul	Evaluationsgröße
Kann die durchgängige Informationsweitergabe umgesetzt werden?	RCP, SPU, DEU	Paketumlauf mit Lese- und Schreibvorgängen
Ist ein kompletter Datenumlauf über das Einlesen des externen Produktdatensatzes, den Demontageprozess und die Rückgabe von validen Prozessinformationen möglich?	RCP, SPU, DEU	Demontageerfolg, Empfangsbestätigung der Prozessdaten auf externer Datenbasis
Ist das Kapazitäts- und Datenstrommanagement ausreichend?	RCP, SPU, DEU	Übertragungsraten
Ist das Informationsmodell standardisiert und herstellerübergreifend umsetzbar?	RCP, SPU, DEU	Compliance mit Spezifikation
Wie reagiert die Steuerung auf unvollständige Informationen?	RCP	Klassifizierungsergebnis in Abhängigkeit der Informationsdichte

Für den Hypothesenkomplex H_2 und $H_{2.1}$ ergeben sich primäre Fragestellungen in Bezug auf das Informationsmodell und dessen Verarbeitung:

- Ist die individuelle Verwertungsentscheidung auf Basis des Informationsmodells möglich?
- Können die statischen und die dynamischen Anteile produktbezogen synchronisiert werden?
- Werden Nachhaltigkeits-Zielaspekte im Entscheidungsprozess inkludiert?

Die Evaluationsgrößen in Bezug auf diese Hypothesen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Ein zentraler Aspekt ist dabei die Entscheidung auf Grundlage des Informationsmodells und den darin enthaltenen Features, wobei vor allem die Genauigkeit des Klassifizierungsergebnisses für die Verwertungsoptionen analysiert werden muss. Die Frage nach der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielsetzungen in der Entscheidungsgrundlage muss ebenfalls untersucht werden. Die dynamischen Informationen der Wahrnehmungseinheit tragen im Demontagekonzept maßgeblich zu der Einschätzung der Verwertungsperspektive auf Basis des tatsächlichen Zustandes bei. Um diesen Systemteil zu evaluieren, soll die Objekterkennung und Klassifizierung sowie das Trainingsverhalten für neue Bauteile und Derivate im Detail bewertet werden.

Tabelle 5.2: Evaluationsgrößen in Bezug auf Hypothese 2 und 2.1

Fragestellung	Zielmodul	Evaluationsgröße
Wie verlässlich ist eine Verwertungsentscheidung?	RCP	Klassifizierungsergebnis
Lassen sich alle Nachhaltigkeits-Dimensionen im Entscheidungsmodul berücksichtigen?	RCP	Feature-Set und Gewichtungen
Kann das Objekterkennungssystem Objekte sicher differenzieren? Wie zuverlässig ist das System für kleine Bauteile?	SPU	Genauigkeit der Objekterkennung unter verschiedenen Bedingungen am Beispiel Schrauben
Wie aufwendig ist das Erlernen der Detektionsfähigkeit neuer Komponenten?	SPU	Training des Detektionsalgorithmus

Für den komparativen Charakter der Hypothese H_3 wird eine abweichende Evaluationsstrategie in Form der prozessbezogenen Falsifikation am Beispiel der Demonstrator-Fallstudie der Moduldemontage vorgenommen. Hierfür werden die primären Fragestellungen wie folgt zusammengefasst:

- Verbessert die autonom planende, hybride Demontage die Effektivität und Effizienz gegenüber der manuellen Vorgehensweise?
- Bietet das Konzept eine hinreichende Grundlage für die MRK in Bezug auf Sicherheit und Assistenzfunktionen?
- Kann das Systemergebnis die ökologischen Perspektiven durch Demontage verbessern?

Die Sekundärfragen und Evaluationsgrößen zur Untersuchung dieser Hypothese sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Die Hauptaspekte der Evaluation zielen auf die Auswertung des Konzeptes in Bezug auf die Auswirkungen auf die Effizienz und Effektivität gegenüber der konventionellen, manuellen Demontage ab. Hinsichtlich der Planungsautonomie des RCP muss sichergestellt werden, dass der Planungsprozess einen Zeitbedarf aufweist, der im Verhältnis zu einer potenziellen Taktzeitvorgabe in einer industriellen Demontage praktikabel ist. Hinsichtlich des Nachhaltigkeitsziels und dabei insbesondere der ökologischen Perspektive, sind Untersuchungen der erreichbaren Fraktionsgüte und den damit verbundenen Auswirkungen auf Zeit und Kosten sowie dem möglichen Werterhalt von Funktionsgruppen erforderlich. Um die besonderen Anforderungen der in der hybriden Demontage auftretenden MRK abzusichern, müssen darüber hinaus das Sicherheitskonzept und die Gebrauchstauglichkeit der Interaktionsschnittstelle geprüft werden.

Tabelle 5.3: Evaluationsgrößen in Bezug auf Hypothese 3

Fragestellung	Zielmodul	Evaluationsgröße
Verbessert das Konzept die Prozesseffektivität?	RCP, SPU, DEU	Demontageerfolg, Ausführungsquote
Verbessert das Konzept die Prozesseffizienz?	RCP, SPU, DEU	Demontagezeit (im Vergleich zum manuellen Prozess)
Ist die produktindividuelle Planungsautonomie im Kontext industrieüblicher Taktzeitkonzepte realistisch?	RCP	Planungszeit, Taktzeiten
Ist die individuelle Entscheidung nachhaltiger als eine allgemeine Entscheidung?	RCP	Vergleich Materialreinheit, Werterhalt der Funktionsgruppen
Wie verlässlich ist das Sicherheitskonzept der MRK?	DEU, SPU	Sicherheitszonen(-halt) unter verschiedenen Bedingungen
Ist die Assistenzfunktion der MRK zielführend?	DEU, SPU	Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung

Die Verknüpfungen der Evaluationsvorgänge für das jeweilige Modul können hypothesenübergreifend gestaltet werden, da die einzelnen Auswertungsaspekte nach der experimentellen Überprüfung wieder den jeweiligen Fragestellungen zugeordnet werden können. Die detaillierte Analyse der einzelnen Evaluationsgrößen ist in Kapitel 5.3 dargestellt und die Zusammenfassung der Ergebnisse als Fazit in Bezug auf die Zielerreichung in Kapitel 5.4.

5.2 Aufbau und Konzeptionierung des Experimentalszenarios

Um die in Abschnitt 5.1 bestimmten Evaluationsgrößen zu überprüfen, ist es erforderlich, eine geeignete Validierungsstrategie festzulegen. Die dafür benötigten Experimente werden entweder physisch am Konzept des Demonstrators oder simulativ im RCP-System durchgeführt. Einige der Kriterien sind dabei nur qualitativ überprüfbar, indem im Sinne einer Funktionsoperationalisierung geprüft wird, ob der geplante Ablauf den Anforderungen entspricht. Für direkt messbares, von Wechselwirkungen betroffenes Systemverhalten wird hingegen eine quantitative Evaluation und Analyse angestrebt. Bei diesen Versuchen werden bestimmte Faktoren betrachtet sowie deren Auswirkungen auf das Systemverhalten, wobei der Systemoutput nicht unveränderlich und deterministisch durch die Systemkonzeption feststeht.

Bei der Gestaltung der Versuchsplanung orientiert sich die Konzeption der Szenarien an den bei *Siebertz et al.* [317] beschriebenen Methoden zur statistischen Versuchsplanung (Engl. *Design of Experiments*, DoE). Es wird versucht, soweit möglich, die Primär- und Sekundärfragestellungen aus den Forschungshypothesen modulbezogen zu bündeln, um die Anzahl der Versuche möglichst effizient zu planen. Da es bei den allgemeinen Aussagen der Hypothese H_3 nicht möglich ist, einen Verifikationsnachweis zu bestätigen, muss hier mittels quantitativer Methoden eine Prüfung auf Falsifikation durchgeführt werden. Bei der Erstellung von Versuchsplänen wird das Open-Source Werkzeug *PyDoE* in der Implementierung nach *Sarkar* [318] eingesetzt. Der Einsatz statistischer Versuchsplanung erlaubt durch die standardisierte Analyse, die Ergebnisse über diese Arbeit hinaus in einem nutzbringenden Kontext zu verwenden. Die Systemgrenzen werden dabei durch das Konzept aus Kapitel 4 und insbesondere die Implementation des Prototypen definiert. Ferner steht bei dem DoE für die Evaluation nicht die Optimierung der Betriebsparameter im Fokus, da das Konzept keinen realen industriellen Prozess abbildet.

Die Aussagen der Experimente stellen im Kontext dieser Arbeit einen *Proof-of-Concept* dar und sind keine vollständige Evaluation hinsichtlich einem direkten Industrieinsatz. Sofern im Rahmen zukünftiger Projekte die Entwicklung dieses Forschungskonzeptes hin zu einer Industrieanlage erfolgen soll, ist die Prüfung unter Berücksichtigung der individuell verwendeten Hardware und Software sowie den gesetzlichen Anforderungen und Sicherheitsbestimmungen zwingend erforderlich.

Die Untersuchung der MRK-bezogenen Punkte ist nur eingeschränkt möglich, da die Evaluation nicht in einer realen, industriellen Umgebung oder mit tatsächlichen Demontagemitarbeitern erfolgt. Aus diesem Grund können hier nur Aussagen zur Abschätzung auf Basis der Laborergebnisse getroffen werden. Eine finale Aussagefähigkeit zu den Hypothesen der Evaluationsgrößen wird nur in den Randbedingungen des Prototyps getroffen, ein signifikantes und aussagefähiges Vergleichsergebnis mit der industriellen Demontageumgebung muss für konkrete Einsatzszenarien bestimmt werden. Auf eine Aussage zur Gebrauchstauglichkeit der Prototypen-App wird daher in Ermangelung der notwendigen Anzahl qualifizierter Probanden gänzlich verzichtet.

In Abbildung 5.1 ist eine Klassifizierung der Experimente hinsichtlich der Auswertungsstrategie (qualitativ/quantitativ) und der Ausführung (physisches Experiment/simulative Umsetzung) abgebildet. Für die integrierten Abläufe anhand der Fallstudie müssen jeweils alle Systemmodule berücksichtigt werden. Bei den Simulationsbetrachtungen wird für jedes Modul getrennt vorgegangen, wobei auf systemkonforme Input-Dateien und Ausgabeformate geachtet wird. Die experimentelle Auswertung der Objekterkennung erfolgt am Prototypen, jedoch wird hier die SPU direkt angesteuert. Für die Prüfung der Sicherheitseinrichtung wird der RCP nicht verwendet, da zur besseren Vergleichbarkeit eine fest programmierte Roboteroperation umgesetzt wird.

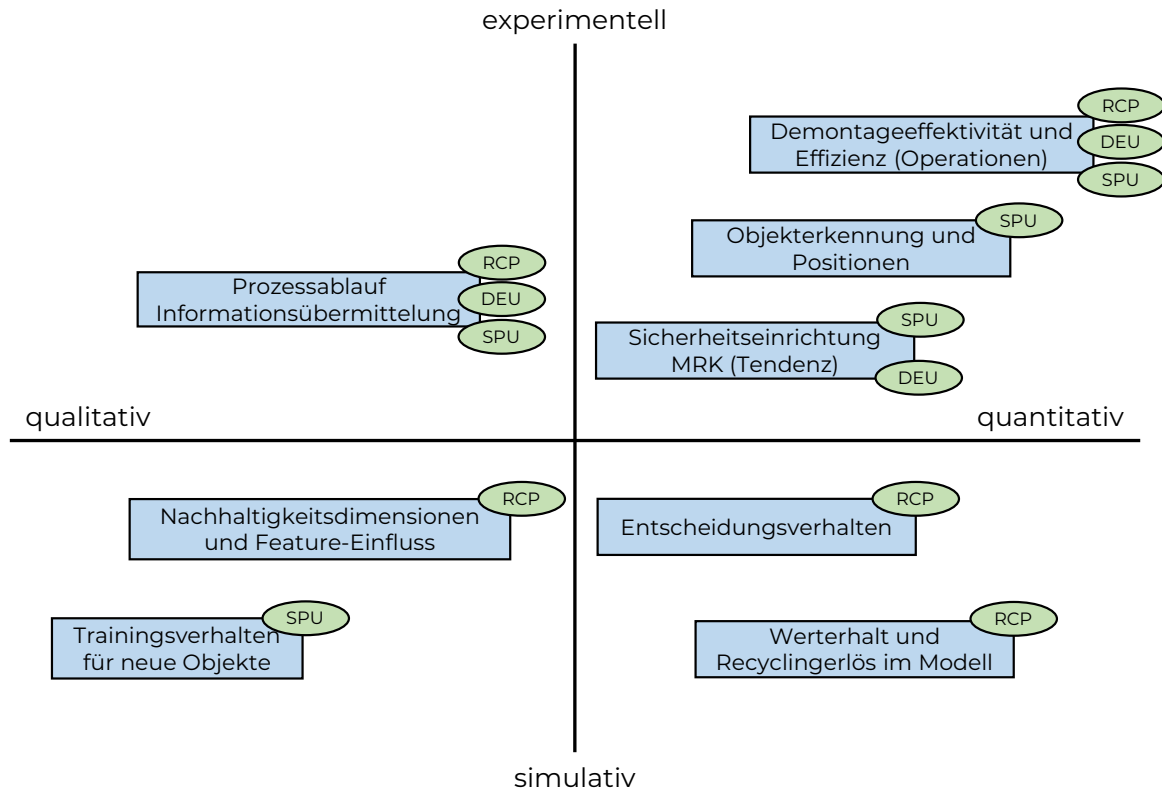


Abbildung 5.1: Klassifizierung der Experimentalszenarien und die betreffenden Module

Im Folgenden werden die einzelnen Experimente beschrieben.

Qualitativ 1: Prozessablauf und Informationsübermittlung

Zur qualitativen Validierung der Informationsübermittlung wird ein vollständiger Prozessablauf nach Abbildung 4.5 für das Fallstudienbeispiel ausgeführt. Hierbei wird durch im Programmcode implementierte Log-Befehle an jedem Prozessschritt der aktuelle Stand des Datenmodells zwischengespeichert, sowie bei modulübergreifender Kommunikation die betreffenden Netzparameter (Datenrate, Umlaufzeiten) dokumentiert. Der Prozess endet mit dem Upload der validierten Prozessdaten zurück auf die dezentrale Informationsplattform. Dieser Versuch weist nach, dass die bidirektionale, auf dem Informationsmodell basierende Kommunikation aus dem entwickelten Konzept technisch möglich und umsetzbar ist (*Proof-of-Concept* der Implementierung am Demonstrator).

Qualitativ 2: Nachhaltigkeitsdimensionen und Feature-Einfluss

Um die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten gemäß der Zielsetzung des Lösungskonzeptes zu überprüfen, wird bestimmt, welchen Einfluss die jeweiligen Features auf das Klassifizierungsergebnis des RCP haben. Hierfür wird eine Korrelationsanalyse für das Klassifizierungsergebnis am Beispieldatensatz durchgeführt und dann hinsichtlich des Einflusses von Parametern nach Zuordnung zu den jeweiligen Nachhaltigkeitsdimensionen (Ökonomie, Ökologie, Soziales, nach [157]) analysiert.

Qualitativ 3: Trainingsverhalten für neue Objekte

Um bewerten zu können, wie aufwendig das Hinzufügen neuer Objekte (Bauteile, Verbinder) für das SPU-Modul ist, wird ein Trainingsablauf evaluiert und hinsichtlich des erforderlichen Aufwandes und der erzielbaren Genauigkeiten analysiert. Da für das Fallstudienbeispiel keine vollständigen CAD-Modelle zur Verfügung stehen, wird ein klassisches Verfahren basierend auf einem Satz Trainingsbilder

betrachtet. Da es sich um die Methodik des *Transfer-Learnings* handelt (siehe [124]), ist es nicht erforderlich das gesamte Training des Modells für jedes Objekt vollständig zu durchlaufen und es können bereits gespeicherte Modellgewichtungen als Ausgangslage des Trainings verwendet werden.

Quantitativ 1: Entscheidungsverhalten

In diesem Szenario wird das Klassifizierungsergebnis des RCP untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist es festzustellen, zu welchem Grad die Vorhersagen des RCP mit einem Referenzdatensatz zur Validierung übereinstimmen. Weiterhin wird untersucht, welche Genauigkeiten bei den jeweiligen Klassen und damit für die konkrete Demontageentscheidung differenzierbar sind. Abschließend wird geprüft, wie sich der Entscheidungsprozess bei unvollständigen Datensätzen verhält und inwiefern eine verlässliche Entscheidung bei reduzierter Informationsdichte möglich ist.

Zur Durchführung wird in einem ersten Schritt eine vollständige simulative Prüfung bezüglich des Zutreffens der Klassifizierungsentscheidung durchgeführt. Für die Vergleichbarkeit des Tests mit den Trainingsbedingungen werden unbekannte Test-Sets mit einer Größe von 32 Samples²⁷ verwendet. Diese Blöcke werden randomisiert aus einer Testmenge von 320 Datensätzen gebildet, sodass insgesamt zehn Durchläufe den Testumfang abbilden. Da die Datensätze der generischen Batterien mit einer gaußverteilten Streuung in den Werten der Features erstellt worden sind, kann bei der Auswertung von einer näherungsweisen Normalverteilung der Ergebnisse ausgegangen werden. Die 320 Samples für das Experiment werden zusätzlich zur Trainings- und Validierungsmenge aus der Konzeptentwicklung erstellt, um ein Auswendiglernen bereits im Training verwendeter Beispiele auszuschließen.

Da der zweite Test in Bezug auf das Genauigkeitsverhalten bei schwankender Informationsdichte (Vorhandensein eines Wertes für jedes Feature und jede Kombination, zwei Stufen) einen deutlich größeren Kombinationsraum aufweist, wird hier eine statistische Prüfung vorgenommen. Der originäre Lösungsraum für den Datensatz nach dem Preprocessing (13 Features) liegt für einen Vollfaktorplan bei (Gleichung 19):

$$\text{Anzahl Versuche} = \text{Anzahl Stufen}^{\text{Features}} = 2^{13} = 8192 \quad (19)$$

Da für eine derart hohe Anzahl an Versuchen nicht ausreichend Samples zur Verfügung stehen, soll ein teilfaktorieller L32-Screening Versuchsplan nach *Plackett-Burman* [317] eingesetzt werden. Um hohe Wechselwirkungen mit einzubeziehen, wird dafür der zunächst statistisch ausreichende L16 Versuchsplan durch *Folding* (invertierte Kopie) erweitert, womit ein L32-Plan der Auflösungsstufe Vier²⁸ verfügbar ist.

Quantitativ 2: Objekterkennung und Positionswerte

Um zu prüfen, wie verlässlich die Erkennung und Positionsbestimmung der Komponenten und Verbindungselemente ist, soll die SPU am Beispiel der Batterie überprüft werden. Da die Detektion von im Bildbereich verhältnismäßig kleinen Objekten schwieriger ist, als die von großen Objekten [149], wird als Referenzobjekt das Verbindungselement der TX30 M6x12 Modulschrauben untersucht, welches das in Bezug auf die Bildpunkte kleinste erkennbare Objekt des Vision-Moduls darstellt.

Die Versuche werden unter kontrollierten Lichtbedingungen (homogene künstliche Beleuchtung) ohne Einfluss des Sonnenlichts ausgeführt. Das Sichtfeld der Kamera deckt die gesamte Batterie ab. Der für

²⁷ Im Trainings ist die Batchgröße = 8 und die die Faltung der Kreuzvalidierung = 4.

²⁸ Haupteffekte sind mit Dreifachwechselwirkungen vermengt, Zweifachwechselwirkungen untereinander. Geeignet, um Haupteffekte sicher zu bestimmen, Zweifachwechselwirkungen sind nicht eindeutig zuzuordnen. [317].

den Test festgelegte Umfang betrifft die 40 Schraubpunkte der zehn querliegenden Module. Die Schwelle der minimalen Sicherheit, ab der eine Erkennung programmseitig festgestellt wird, ist auf 90% eingestellt, um zu vermeiden, dass es zu einer Fehlklassifikation (Verwechslung mit anderen Schraubenarten) kommt. Um eine hinreichende Menge Daten aufzunehmen, wird der Versuch mit 50 Durchläufen wiederholt.

In Bezug auf die Positioniergenauigkeit der Bilderkennung wird dabei ebenfalls die Schwankung der vom Kamerasystem bestimmten Position der Schrauben ausgewertet. Die Abweichungen in den Positionen pro Durchgang lassen dabei Rückschlüsse auf die Toleranz der SPU-bedingten Wiederholgenauigkeit des Systems zu. Die Referenzposition im Verhältnis zum Robotersystem muss anwendungsspezifisch mittels Hand-Auge-Kalibrierung bestimmt werden (vgl. [253]).

Quantitativ 3: Demontageoperationen, Effektivität und Effizienz

Zur Evaluation der mit dem Systemkonzept erreichbaren Effektivität und Effizienz im Demontagebetrieb, wird am Beispiel der Fallstudie zur Moduldemontage ein Vergleich gegenüber der manuellen Demontage vorgenommen.

Die Durchführung des Experiments erfolgt als MRK-Anwendung, in welcher der Roboter die Verbindungsschrauben eines Moduls löst und der Mitarbeiter das demontierte Modul aus der Batterie entnimmt. Diese Operation stellt die roboterbezogene Kernaufgabe des Demonstrators da und ermöglicht gleichzeitig die Berücksichtigung der Einflussgröße des Menschen. Nicht alle Schrauben der Batterie sind erreichbar, da keine Linearachse verbaut ist, deshalb erfolgt nur die wiederholte Demontage eines Moduls. Dies ist bereits durch die Arbeitsraumeinschränkung in der Beschreibung des Prototyps berücksichtigt.

Für den Versuch wird sowohl der Demontageerfolg, als auch die tatsächlich benötigte Demontagezeit aufgenommen. Der Basiswert für die manuelle Demontage wird mittels Arbeitsablauf-Zeitanalyse (System vorbestimmter Zeiten, hier MTM) bestimmt. Die Verwendung von MTM-Vorgabezeiten wird genutzt, da alle Mitarbeiter individuell sind und es nicht möglich ist, eine repräsentative Menge an Versuchsteilnehmenden zu gewinnen. MTM ist insofern wissenschaftlicher, da die Werte auf der Grundlage einer sehr großen Datenbasis entwickelt wurden und somit als abgesichert angesehen werden können.

In Bezug auf den Demontageerfolg gilt der Versuch als gescheitert, wenn das Robotersystem einen als Automatisierungsschritt geplanten Operationsbaustein nicht ausführen kann. Für den Vergleich der Zeiten gilt der Versuch als gescheitert, wenn das Anlagenkonzept mehr Zeit benötigt, als die manuelle Vorgabezeit. Da sowohl die Aussage in Bezug auf die Effizienz als auch auf die Effektivität gegenüber der manuellen Demontage eine Aussage zu einer allgemein formulierten Hypothese treffen sollen, ist es erforderlich, eine signifikante Falsifikationsstrategie anzuwenden. Hierfür werden für den Test folgende Nullhypothesen formuliert:

Effektivität: $H_0 := p_{\text{sys}} \geq 0,8$; $H_1 := p_{\text{sys}} < 0,8$ mit p_{sys} als Erfolgsquote der Versuche

Effizienz: $H_0 := p_{\text{aut}} \geq 0,8$; $H_1 := p_{\text{aut}} < 0,8$ mit p_{aut} als Quote der effizienteren Automatisierungsschritte

Als Signifikanzniveau des Versuchs wird $\alpha = 5\%$ als in der Industrie gebräuchlicher Wert festgelegt. Um die Annäherung an die Normalverteilung in Bezug auf die zufällige Versuchsstreuung bei angenommener Binomialverteilung zu erlauben, soll die Anzahl der Versuche anhand der Laplace-Bedingung ($\sigma > 3$) festgelegt werden. Für eine Standardabweichung von $\sigma = 3,098$ sind 60 Versuchsdurchgänge erforderlich, mit einem Erwartungswert von $\mu = 48$ für beide Experimente. Da es sich um eine

einseitige Annahmegrenze handelt, wird die Hypothese im linksseitigen 95%-Konfidenzintervall akzeptiert und nicht verworfen ($\mu - 1,64 \cdot \sigma$). Es ergibt sich damit ein Ablehnungsintervall $[0; 42]$ und ein Annahmebereich $[42; 60]$.

Quantitativ 4: Werterhalt und Recyclerl s im Modell

Ziel des vierten Experiments ist die Prüfung, inwieweit sich die RCP-Entscheidung auf Werterhalt der Komponenten und den perspektivischen Recyclingwert gegenüber einer konstanten, monodirektionalen Verwertungsentscheidung unterscheidet.

Hierfür werden die Features Demontagekosten (*PDisassembly*), Komponentenrestwert (*ExpCompResale*) und der zu erwartende Erlös aus dem Recycling (*ExpRecPrice*) für die 320 Testsamples aus dem Experiment zum Entscheidungsverhalten analysiert und drei Alternativszenarien gegenübergestellt:

- Szenario 1: Vollständige Demontage mit dem Ziel Recycling
- Szenario 2: Vollständige Demontage mit dem Ziel Reuse
- Szenario 3: Keine Demontage

Bei der Auswertung des Versuchs wird überprüft, inwieweit das Gesamtergebnis über alle Samples des Testumfangs aus der RCP-Entscheidung von den Szenarien abweicht. Darüber hinaus wird bestimmt, welcher Erreichungsgrad des theoretischen wirtschaftlichen Optimums durch den RCP erzielt werden kann.

Quantitativ 5: MRK-Sicherheitseinrichtung

In der experimentellen Untersuchung der MRK-Sicherheitseinrichtung soll eine Abschätzung getroffen werden, ob sich kamerabasierte Methoden der Arbeitsraumüberwachung im Bereich der Demontage eignen, um eine ausreichende Sicherheit der Mitarbeitenden zu gewährleisten. Da es sich beim Demonstrator weder um eine vollständige, industrielle Demontageanlage handelt, noch eine ausreichende Menge Probanden mit repräsentativen Eigenschaften für Mitarbeitende in Demontagebetrieben zur Verfügung steht, sind die Ergebnisse dieses Versuchs nur als Tendenzaussagen im Kontext der Konzeptentwicklung verwertbar.

Geprüft werden die Sicherheitszonen zur Verlangsamung der Anlage sowie das Halteverhalten unter verschiedenen Bedingungen für das Kamerasystem. Genutzt wird für diesen Algorithmus die Flanschkamera des Roboters. Um eine Vergleichbarkeit der Auswirkungen der unterschiedlichen Bedingungen zu erzielen, wird der Roboter für diesen Versuch in einem vorgegeben Pfad verfahren.

Für die Variation der Bedingungen werden drei Objekte im Arbeitsbereich verwendet, die im Demontageprozess üblicherweise einer potentiellen Gefährdung durch das Roboterwerkzeug ausgesetzt sind: Hand, Hand mit Handschuh, Hand mit Handschuh und Werkzeug. Da das Modell ausschließlich auf Menschen und nicht explizit auf Objekte anspricht, sind Handschuh und Werkzeug als Störgrößen zu verstehen. Die Annäherung erfolgt jeweils aus allen vier Bildrichtungen, um eine Beeinflussung aufgrund der optischen Eigenschaften der Kamera zu minimieren. Lichtbedingungen und Geschwindigkeit sind konstant entsprechend dem Konzept aus 4.3.2. Um eine ausreichende Menge an Iterationen zu prüfen, werden pro Kombination 10 Durchgänge gefahren, was einem Gesamtumfang von 120 Versuchsdurchläufen entspricht.

5.3 Auswertung

Zur detaillierten Analyse der qualitativen und quantitativen Untersuchungen in Bezug auf die Evaluationsgrößen werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Versuche dargestellt und untersucht. Die ermittelten Zahlenwerte beziehen sich auf die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Experimente im Kontext des Systemprototypen aus Kapitel 4.5.

5.3.1 Qualitative Analyse

Im Folgenden wird die Analyse der qualitativen Versuche beschrieben.

Qualitativ 1: Prozessablauf und Informationsübermittlung

Der vollständige Prozessablauf des Prototyps bestätigt durch die erfolgreiche Informationsübertragung an allen Schnittstellen innerhalb des Systems und zum externen Datenmarktplatz die grundsätzliche Funktionsweise als *Proof-of-Concept*. Die Informationsweitergabe sowie ein kompletter Datenumlauf über das Einlesen des externen Produktdatensatzes, den Demontageprozess und die Rückgabe von validen Prozessinformationen konnten positiv validiert werden.

Die Prozesszeiten und Paketgrößen wurden in diesem Versuch durch programmeigene Logger sowie durch die Überwachung der Netzwerkkommunikation mittels der Tools *UA Expert*, *Wireshark* und *MQTT Explorer* ausgewertet. Die Verbindungen wurden dabei jeweils mit den konzeptspezifischen Sicherheitseinstellungen getestet und die externe Kommunikation erfolgt verschlüsselt. Die Ergebnisse der OPC-Messungen stellen jeweils durchschnittliche Werte über 100 Messungen dar. Das konzeptteilene Netzwerk wurde während der Prüfung keinen künstlichen Störeinflüssen ausgesetzt.

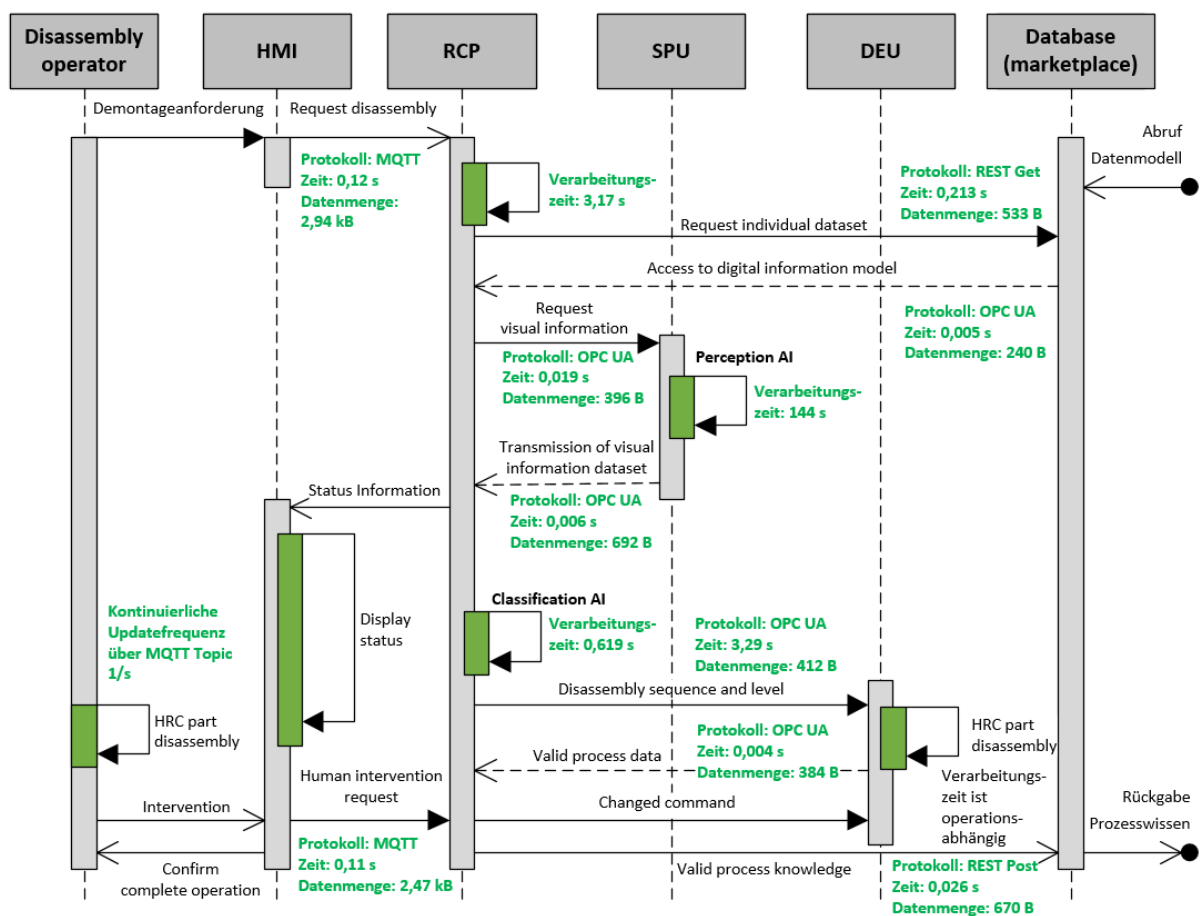


Abbildung 5.2: Auswertung der Systemkommunikation und Informationsübermittlung

In Abbildung 5.2 ist das Ergebnis des Versuchs in Form der jeweiligen Messergebnisse pro Verbindung und Systemprozess in einem UML-Sequenzdiagramm in Anlehnung an Abbildung 4.34 für den Prototyp dargestellt. Die Systemkommunikation ist damit durchgängig abgebildet. Bis auf den Schritt der Klassifizierungs-KI im RCP verläuft der gesamte Prozess konvertierungsfrei. Für die Bestimmung der EoL-Option ist ein Parser notwendig, der die Informationen aus dem OPC-Informationsmodell in eine CSV-Datei als tabellarisches Zielformat konvertiert. Dieser Schritt benötigt allerdings kaum Systemressourcen und ist in einer im Verhältnis zur Verarbeitungszeit geringen Zeitspanne verlustfrei durchführbar.

Die MQTT Kommunikation findet überwiegend im Frontend-Bereich der Demontageanwendung statt. Das HMI nimmt den Demontagebefehl für ein Fahrzeug auf und gibt diesen via MQTT an den RCP weiter. Gleichzeitig werden über unterschiedliche Topics die Statusinformationen der Anlage auf dem HMI mit einer Frequenz von einem Hertz kontinuierlich aktualisiert und dargestellt. Sollte eine manuelle Intervention seitens den Bedienenden erforderlich sein, wird diese Eingabe ebenfalls über MQTT weitergegeben. Die Aufforderungen benötigen bis zur Verarbeitung im RCP etwa 120 Millisekunden, wobei Datenpakete mit einer Größe von maximal ca. 2,5 Kilobyte übertragen werden.

Die OPC-Kommunikation stellt den Hauptteil der Schnittstellen innerhalb des Systems dar. Die Übertragungen liegen bei allen Schritten im Bereich von wenigen Millisekunden bei kleinen Nachrichtengrößen mit weniger als einem Kilobyte Datenmenge. Die Netzwerkauslastung ist durch die Systemkommunikation sehr gering, was für die Skalierbarkeit in großen Netzen mit vielen Endgeräten spricht. Die Rückgabe validierter Werte aus dem System an den Datenmarktplatz erfolgt ebenfalls über den OPC Server auf dem RCP. Hier schreibt das System für die Abfrage der Variablen *DisassemblyResult* bei *true* die Achswerte im Robotermodell nach der Companion-Specification für das jeweilige Bauteil auf den Server. Dieser Datensatz wird dann mittels *REST-Post* Befehl an den Datenmarktplatz übertragen. Die bidirektionale Kommunikationskette wird damit geschlossen. Für diese Kommunikation wird im Vorfeld kein Token vergeben. Es ist nicht Gegenstand dieses Versuchs zu prüfen, wie dieser Prozessschritt in einem Informationshandel sicher und abrechnungskonform eingebunden werden kann. Die externen Kommunikationsschritte zum Datenmarktplatz werden ebenfalls über *REST* mittels Client-Server-Kommunikation über eine IP-Schnittstelle umgesetzt.

Die Frage nach der Eignung des Konzeptes im Kontext von Taktzeitlimitierungen und dem Aufwand durch Verarbeitungszeiten der einzelnen Prozessschritte lässt sich auf Grundlage der Messergebnisse ebenfalls beantworten. Die längste Verarbeitungszeit benötigt die SPU für die Erkennung des gesamten Arbeitsbereiches mit 2 Minuten und 24 Sekunden. Da dieser Prozessschritt in der Ausführlichkeit nicht nach jeder Zustandsveränderung erneut ausgeführt werden muss, kann in der Praxis für eine komponentenbezogene Szenenüberwachung ein deutlich geringerer Wert angenommen werden. Dieser lässt sich z. B. auch durch die Einrichtung verschiedener RoI im direkten Arbeitsbereich reduzieren. Der Planungsprozess im RCP verläuft mit 619 Millisekunden für die Klassifizierung und 3,29 Sekunden für die Übertragung der Demontagesequenz an die DEU in einer Geschwindigkeit, die sich für industriübliche Taktzeiten eignet. Hierbei ist zu bedenken, dass der Zeitanteil der Sequenzplanung mit einem mit der Erhöhung der Komponentenanzahl exponentiell steigenden Zeitanteil geplant werden muss und theoretisch für sehr große Planungsräume nicht mehr berechenbar wird. Da die Batterie jedoch ein praxisnahes System darstellt, wird hier für ähnliche Produkte, z. B. im Automobilbereich mit einer ähnlichen Komponentenmenge, wahrscheinlich ebenfalls eine Planungszeit unter 10 Sekunden den Regelfall darstellen. Dieses Ergebnis ist ebenfalls von der verwendeten Hardware abhängig, sodass eine Beschleunigung durch zentrale Rechnersysteme oder Cluster denkbar ist.

Qualitativ 2: Nachhaltigkeitsdimensionen und Feature-Einfluss

Zur Klärung der Frage, ob die RCP-Entscheidung die Nachhaltigkeitsdimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales berücksichtigt, werden die Features des Informationsmodells der Traktionsbatterie nach der Verdichtung durch das Preprocessing im RCP in Tabelle 5.4 den Dimensionen zugeordnet. Bei einer Mehrfachzuordnung kann der jeweilige Faktor Auswirkungen auf alle genannten Kategorien haben.

Tabelle 5.4: Zuordnung der Features im Datensatz bezüglich der Nachhaltigkeitskategorien

Ökonomische Faktoren	Ökologische Faktoren	Soziale Faktoren
Produktionsdatum	Produktionsdatum	Sozialer Bewertungsfaktor
Funktionstauglichkeit (Operabilität)	Funktionstauglichkeit	
Kaufpreis EoL-Produkt	Diagnosewert (SoH)	
Diagnosewert (SoH)	Optische Bewertung	
Optische Bewertung	Umwelt-Bewertungsfaktor	
Demontagekosten	Gewichtsabweichung	
Erwartb. Komponentenverkaufswert		
Nachfrage		
Preisveränderungen		
Erwartbarer Recyclingpreis		

Der überwiegende Anteil der Faktoren aus dem Informationsmodell berücksichtigt ausschließlich die ökonomische Dimension der Produktverwertung. Dies umfasst sowohl wichtige Kenngrößen bezüglich der Qualität der Komponenten, wie Produktionsdatum, Operabilität (Funktionstauglichkeit), Diagnose- und optische Bewertungswerte, als auch Prozesskosten und zu erwartende Erlöse sowie externe Marktfaktoren. Einige dieser Werte teilen ebenfalls eine ökologische Dimension, da sie eine Relevanz hinsichtlich der Möglichkeiten einer höheren Stufe in der Verwertungshierarchie (Erweiterung der Lebensdauer, vgl. Abbildung 2.1) implizieren. Zur Berücksichtigung der Signifikanz von produktspezifischen Analysen hinsichtlich ökologischer Einflüsse (z. B. LCA) im Kontext der Kreislaufwirtschaft, wird der Umwelt-Bewertungsfaktor im Informationsmodell vorgehalten. Kein originärer Faktor im Modell impliziert die soziale Dimension der Nachhaltigkeit. Hierfür wurde im Informationsmodell ein weiterer arbiträrer Faktor hinzugefügt, in welchem beispielsweise sozial kritische Lieferketten in Abhängigkeit von der Rohstoffzusammensetzung oder Ergonomieaspekte berücksichtigt werden können.

Die Auswirkungen der Faktoren auf das Klassifizierungsergebnis werden mit Hilfe einer Korrelationsanalyse untersucht, um den Einfluss der jeweiligen Faktoren auf das Entscheidungsergebnis statistisch anzugeben. Für die statistische Analyse wurde die Software *R* verwendet [319]. Es erfolgt lediglich eine qualitative Betrachtung der Ergebnisse (Korrelationsart und Stärke zwischen den Faktoren) und kein Nachvollzug der expliziten Zahlenwerte.

Die Analyse in Abbildung 5.3 zeigt, dass es sowohl zwischen den Werten des Testdatensatzes stärkere Korrelationen gibt, als auch in Bezug auf deren Auswirkungen auf das Klassifizierungsergebnis. Die Werte liegen entsprechend dem *Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizienten* zwischen Null und Eins, wobei das Vorzeichen angibt, ob die Modellgerade steigt oder fällt. Für den vorzeichenunabhängigen Extremwert von Eins läge eine vollständige, lineare Proportionalität zwischen den Features vor. In Bezug auf die Verknüpfung der Features miteinander fällt auf, dass vor allem Core-Preis und Demontagezeit (eine teurere Batterie kann komplizierter sein und daher mehr Zeit zur Demontage erfordern), Core-Preis und Wiederverkaufswert sowie potenzieller Recycling-Erlös und Demontagekosten sowie soziale/ökologische Bewertungsfaktoren eine relativ starke Korrelation aufweisen. Die Wechselwirkungen

zwischen den Features sind Eigenschaften des Testdatensatzes und können somit einerseits durch physikalische oder wirtschaftliche Beziehungen oder rein zufällig bedingt auftreten.

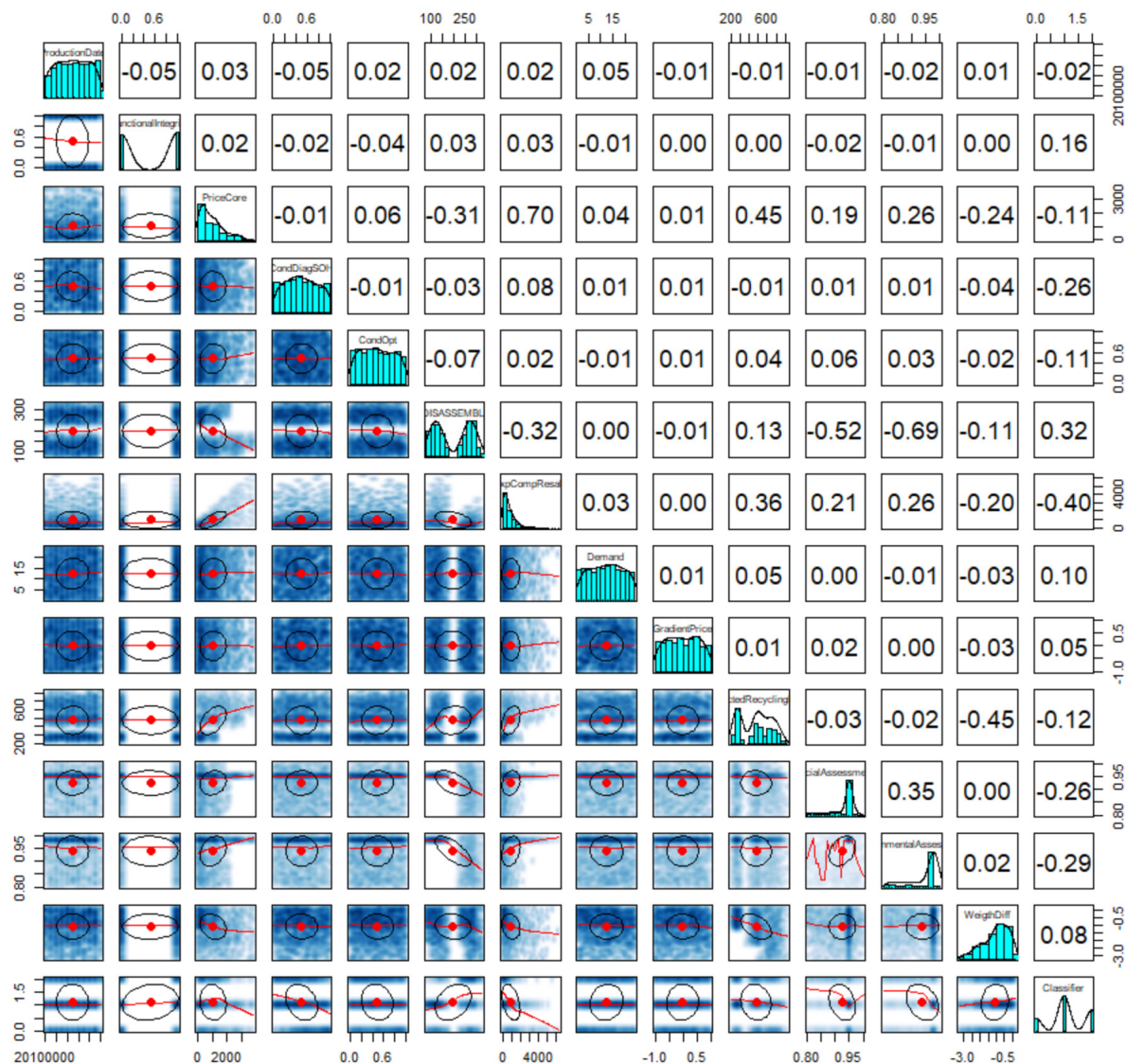


Abbildung 5.3: Plot der Korrelationsanalyse für die Features der Testdaten

In Bezug auf das Klassifizierungsergebnis können zwei Relevanzgruppen innerhalb der Korrelationswerte unterschieden werden: keine bis schwache Korrelation und signifikante Korrelation. Features wie das Produktionsdatum, die optische Bewertung, die Nachfrage sowie die Preisveränderungen haben nahezu keine Korrelation mit dem Klassifizierungsergebnis. Die Funktionstauglichkeit, der zu erwartende Recyclingerlös und die Gewichtsdivergenz zum theoretischen Wert bei Eingangsprüfung weisen eine schwache lineare Korrelation auf. Der Bezugspreis der Cores, die Demontagezeit sowie der soziale und der ökologische Bewertungsfaktor korrelieren vom Verlauf her nicht linear mit dem Klassifizierungsergebnis, wobei der Korrelationskoeffizient der Bewertungsfaktoren und der Demontagezeit signifikant ist. Die stärkste lineare Korrelation besteht zwischen dem Klassifizierungsergebnis und dem erwartbaren Weiterverkaufswert der Komponenten des Produktes. Da viele Features eine ähnlich geringe Korrelation mit dem Klassifizierungsergebnis für das Testset aufweisen oder einen nichtlinearen Verlauf der Regression zeigen, bestätigt sich der Ansatz, die Zahl der Features nicht durch eine PCA im Preprocessing zu reduzieren, da hier womöglich Features ausgeschlossen würden, die für das Entscheidungsergebnis in bestimmten Parameterkonstellationen maßgeblich sein können.

Die bedeutendsten Werte sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst und deren Auswirkungen auf die jeweilige Nachhaltigkeitsdimension verdeutlicht.

Tabelle 5.5: Signifikante Features des Klassifizierungsergebnisses (Reihenfolge absteigend)

Feature [Korr. Koeff.]	Ökonomie	Ökologie	Soziales
Erwartbarer Komponentenverkaufswert [-0,40]	+	-	-
Demontagekosten [0,32]	+	-	-
Ökologischer Bewertungsfaktor [-0,29]	-	+	-
Diagnosewert (SoH) [-0,26]	+	+	-
Sozialer Bewertungsfaktor [-0,26]	-	-	+
Funktionstauglichkeit [0,16]	+	+	-

Zusammenfassend kann das Ergebnis der qualitativen Evaluation der Feature-Einflüsse, mit dem besonderen Fokus auf der Berücksichtigung der Nachhaltigkeit, die Zielformulierung bestätigen. Das Klassifizierungsergebnis korreliert mit Features aus allen Kategorien, obwohl aufgrund der Art der Evaluation keine direkte Aussage zum Kausalzusammenhang getroffen werden kann. Die ökologischen und sozialen Faktoren im Testdatensatz wurden für das Experiment zufällig generiert und sind nicht abhängig von anderen Features. Der RCP hat für die Faktoren im Training eine signifikante Gewichtung erlernt und es ist möglich dies durch einen Korrelationsnachweis zu bestätigen. Im praktischen Einsatz verändern sich die Entscheidungen des RCP und damit die Gewichtungen der einzelnen Features durch den sich vergrößernden Pool an Trainingsdaten kontinuierlich, wodurch die Gewichtung der Nachhaltigkeitsdimensionen für die Verwertungsentscheidung veränderlich ist und komplexen Einflüssen auf die Kreislaufwirtschaft unterliegt. Es können in der Praxis auch weitere Features der jeweiligen Kategorie hinzugefügt werden. Das Modell ist damit technisch fähig, Nachhaltigkeitsdimensionen im Ergebnis abzubilden.

Qualitativ 3: Trainingsverhalten für neue Objekte

Um das Trainingsverhalten der SPU für das Hinzufügen einer neuen Klasse (Bauteil oder Verbindungselement) zu untersuchen und einzuordnen, wird ein durchgängiger Prozessablauf betrachtet und qualitativ analysiert. Die Auswertungsergebnisse beziehen sich auf das Training mit einer aktuellen Workstation mit *AMD Ryzen 3950X* Prozessor (16 Kerne), 64 GB Arbeitsspeicher und einer *Nvidia RTX 2080ti* Grafikkarte unter *Ubuntu 18.04 LTS*.

Da das letzte Layer der verwendeten Netzarchitektur (siehe 4.3.2) eine Softmax-Funktion ist, entspricht jedes Neuron einer Klasse der Wahrscheinlichkeitsverteilung. Es ist daher nicht möglich, in der gegebenen Architektur zusätzliche Klassen direkt hinzuzufügen, sodass es erforderlich ist, den gesamten Umfang der Bilderkennung mit einer zusätzlichen Klasse erneut zu trainieren. Dabei kann im Rahmen des Transfer-Learning auf einen vortrainierten Modellzustand aus einem von Tensorflow bereitgestellten Checkpoint zurückgegriffen werden. Es ist nicht empfehlenswert den Checkpoint des vorherigen Endzustandes zu verwenden, da die Gewichtungen durch eine Verschiebung der Klassifikationsziele eine erhöhte Fehlklassifizierungsrate zur Folge haben können.

Für jede Klasse werden 496 Bilder im Kontext des Gesamtproduktes als Trainingsdatensatz aufgenommen und manuell gelabelt. Diese verhältnismäßig geringe Anzahl ist ausreichend, da das System die Komponenten nur in der Umgebung der Batterie zu erkennen hat und keine allgemeine Fähigkeit zur Erkennung der Strukturen außerhalb des Einsatzkontextes erreicht werden muss. Weiterhin werden die Bilder mittels Data-Augmentation zufällig horizontal gespiegelt, vertikal gespiegelt und um 90° gedreht,

um im Trainingsprozess die Input-Menge zu vergrößern, ohne die eigentliche Bildanzahl zu erhöhen. Dies vermindert außerdem die Wahrscheinlichkeit des Overfitting auf eine einzelne Klasse.

Um den Datensatz der Klassen in Trainings- und Evaluationsbeispiele zu trennen, werden 12,5% der Trainingsbilder pro Klasse (62 Stück) als Evaluationsbilder im Trainingsprozess verwendet. Die Zielmetrik der erreichbaren Genauigkeit wird im Training für das Gesamtnetz als mittlere Durchschnitts-Genauigkeit (mAP , siehe Gleichung 11) über alle Klassen im Trainingsprozess ausgewertet.



Abbildung 5.4: Auswertung Trainingsverhalten SPU Objekterkennung

Die Verlustfunktion und die mAP in Abbildung 5.4 zeigen, dass die Verlustfunktion bis etwa Schritt 160.000 minimiert werden kann. Die allgemeine mAP ist bereits ab ca. 30.000 Schritten nicht mehr signifikant besserbar. Da jedoch die Genauigkeit für kleine Objekte in diesem Bereich noch stark schwankt (0,32 bis 0,2) ist dieser Trainingsumfang noch nicht ausreichend. Die maximale Stabilität der Genauigkeit über alle Objektgrößen wird gleichzeitig mit der minimierten Verlustfunktion nach 160.000 Schritten erreicht. Auch kleine Objekte weisen im Bereich von 100.000 Schritten eine hinreichend stabile mAP auf, daher soll hier aufgrund des Experiments eine praktische Trainingsgrenze festgelegt werden. Durch diese Reduzierung kann die Trainingszeit im gleichen Hardwaresetup auf etwa 17 Stunden reduziert werden. Unter Einbezug der manuellen Vorbereitung der Trainingsdaten entspricht damit der Aufwand einer neuen Klasse etwa 2 Personentagen zuzüglich der reinen Rechenzeit. Durch den Einsatz aktuellerer Netzmodelle kann in zukünftigen Projekten die Genauigkeit weiter gesteigert und der Trainingsaufwand durch effizientere Algorithmen mit hoher Wahrscheinlichkeit verbessert werden.

5.3.2 Quantitative Analyse

Im Folgenden wird die Analyse der quantitativen Experimente beschrieben.

Quantitativ 1: Entscheidungsverhalten

Die Untersuchung des Entscheidungsverhaltens der RCP-KI wurde mit 320 neuen Testbeispielen in zehn randomisierten Blöcken mit $n=32$ Samples untersucht. Die Abbildung 5.5 zeigt die jeweils erreichte Klassifizierungsgenauigkeit in Bezug auf die *true positives* der jeweiligen Testblöcke. Der Mittelwert der Klassifizierungsgenauigkeit liegt bei den zufälligen Testdaten bei 56,56%, was nicht zuletzt an den Testblöcken neun und zehn liegt, für die sehr niedrige Genauigkeiten von 18,75% und 28,13% erreicht werden konnten. Das beste Ergebnis konnte mit 84,38% im dritten Block erzielt werden.

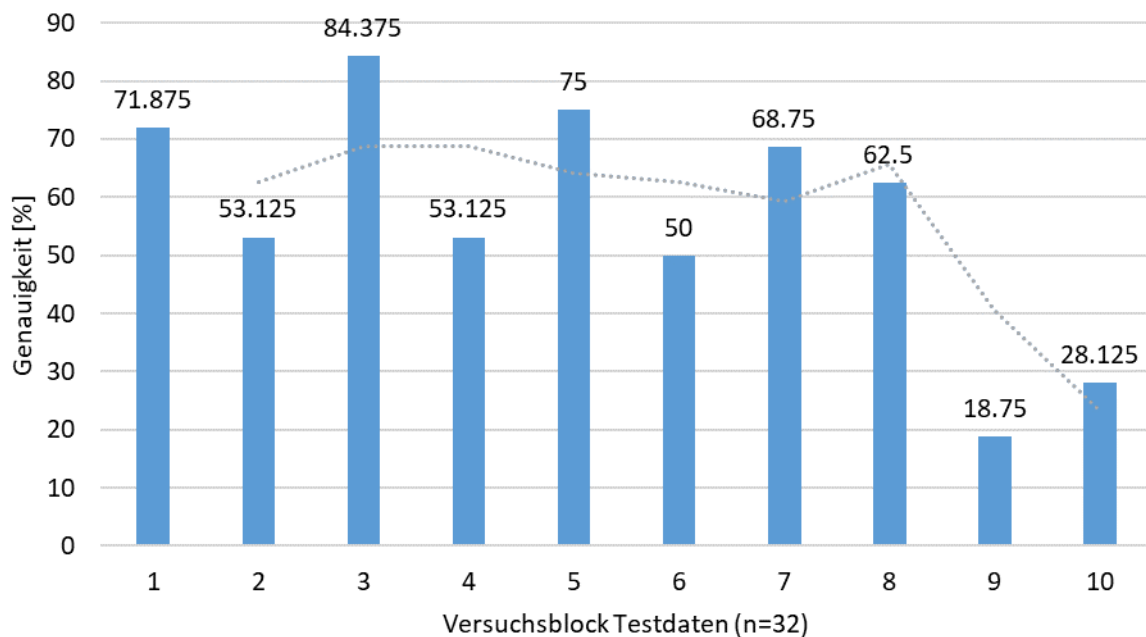


Abbildung 5.5: Klassifizierungsgenauigkeit (*true positives*) für unbekannte Testdaten mit gleitendem Durchschnitt

Bei Betrachtung der einzelnen Blöcke im Detail wird deutlich, dass es große Unterschiede in der Klassifizierungsgenauigkeit zwischen den einzelnen Klassen gibt. Es zeigt sich als Ergebnis für die einzelnen Klassen:

- Klasse 0 (Demontage für Reuse) = 89,23%
- Klasse 1 (Demontage für Recycling) = 40,55%
- Klasse 2 (keine Demontage) = 56,25%

Das niedrige Ergebnis für die Demontage mit dem Ziel des Recyclings wird dadurch verursacht, dass das System dazu neigt, die Demontage für einen funktionsorientierten Werterhalt zu bevorzugen. Tendenziell entscheidet das System eher eine Baugruppe zu demontieren, als die Demontage abzulehnen.

In Abbildung 5.6 sind für jeden Block die einzelnen Entscheidungen den Referenzdaten in Form von Konfusionsmatrizen gegenübergestellt. Hierbei sind korrekte Klassifizierungen grün dargestellt. Da die Entscheidung für oder gegen die Demontage für den praktischen Betrieb des Systems Priorität hat, werden Fehlklassifizierungen innerhalb der zur Demontage bestimmten Teile (also Vertauschungen zwischen Klasse 0 und Klasse 1) gelb markiert und haben einen geringen (negativen) Einfluss auf die Anlage. Klassifizierungsfehler, die die Operationsentscheidung vertauschen sind rot dargestellt.

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	6	2	2
Demontage Recycling	0	3	4
Keine Demontage	0	1	14

Block 1

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	4	4	6
Demontage Recycling	0	6	4
Keine Demontage	0	1	7

Block 2

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	13	3	0
Demontage Recycling	2	7	0
Keine Demontage	0	0	7

Block 3

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	11	5	0
Demontage Recycling	4	4	0
Keine Demontage	1	5	2

Block 4

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	4	2	2
Demontage Recycling	0	16	4
Keine Demontage	0	0	4

Block 5

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	7	2	8
Demontage Recycling	0	3	6
Keine Demontage	0	0	6

Block 6

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	4	1	4
Demontage Recycling	0	6	5
Keine Demontage	0	0	12

Block 7

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	5	6	1
Demontage Recycling	0	6	1
Keine Demontage	0	4	9

Block 8

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	3	12	1
Demontage Recycling	0	2	0
Keine Demontage	0	13	1

Block 9

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	1	11	0
Demontage Recycling	0	6	0
Keine Demontage	0	12	2

Block 10

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	58	48	24
Demontage Recycling	6	59	24
Keine Demontage	1	36	64

Gesamt

Predicted / Correct	Demontage Reuse	Demontage Recycling	Keine Demontage
Demontage Reuse	0.2	0.2	0.1
Demontage Recycling	0	0.2	0.1
Keine Demontage	0	0.1	0.2

Gesamt Verhältnisse

Abbildung 5.6: Konfusionsmatrizen der Versuchsblocke zu je 32 Samples

Hierbei wird deutlich, dass sich das System bei den Klassifizierungsfehlern häufiger (Verhältnis ca. 2:1) für eine Demontage eines wirtschaftlich nicht lohnenswerten Bauteils entscheidet, als dafür, ein Bauteil nicht zu demontieren, das demontiert werden könnte. Nur in zwei der 320 Beispiele kommt der Fall vor, dass das System gegen die Demontage entscheidet, obwohl diese das ideale Verwertungsziel darstellt.

Die Gesamtgenauigkeit des Systems in Bezug auf die *Demontageentscheidung* ist damit auf **82,21%** validiert worden. Die korrekte Festlegung der Verwertungsoption für nachgelagerte Prozesse gelang nur in **56,56%** der Fälle. Da die 320 Testdaten manuell erstellt wurden, ist nicht auszuschließen, dass es durch menschliche Fehler zu Diskrepanzen zwischen den Test- und den 1200 Trainingsdaten gekommen ist, die das Ergebnis beeinflusst haben.

Für die Untersuchung des Effekts unvollständiger Datensätze auf die RCP-Entscheidungen wurde ein L32-Versuchsplan nach *Plackett-Burman* getestet. Gegenüber eines vollfaktoriellen Versuchs werden hier nur 0,39% der möglichen Versuchskombinationen getestet. Da für jedes Feature bei allen Stufen Daten mit völlig unterschiedlichen Ausgangspositionen verwendet werden, hat der Test dennoch eine signifikante Aussagekraft. Irreguläre Plackett-Burman Felder vermengen Haupteffekte normalerweise mit Zweifachwechselwirkungen, durch das Folding wurden hier Vermengungen aufgelöst, um die Haupteffekte freizulegen (Auflösungsstufe 4) [317].

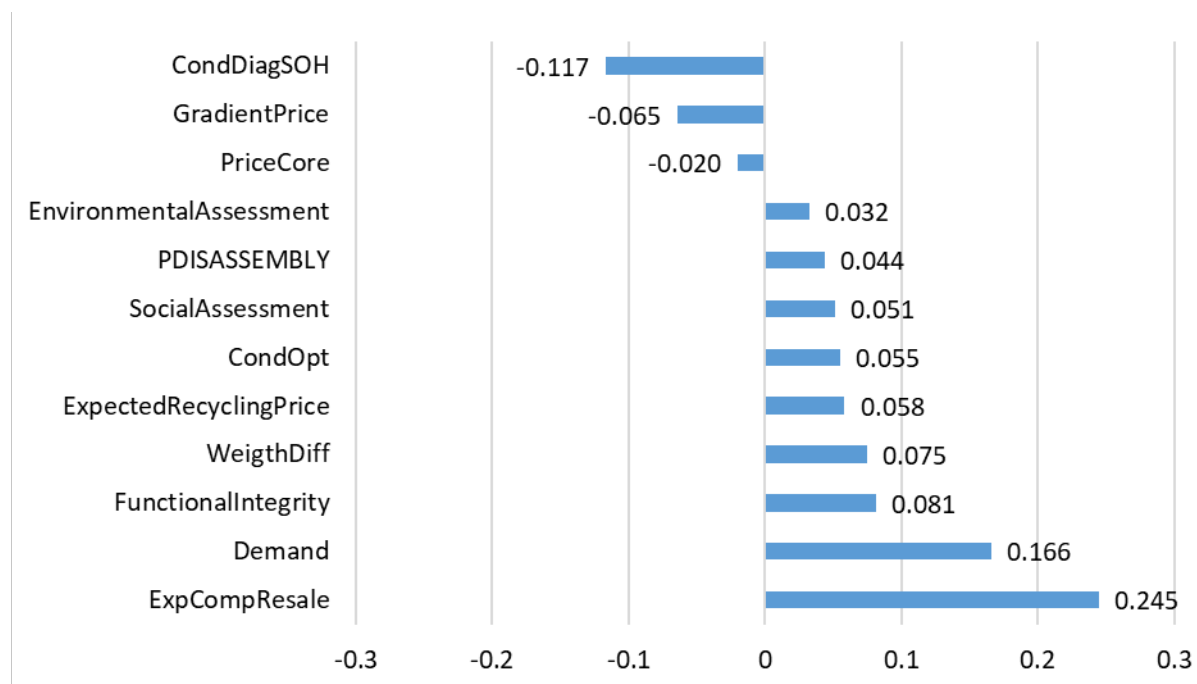


Abbildung 5.7: Haupteffekte (dimensionslos) aus Plackett-Burman L32 Versuch

Eine Auswertung der Haupteffekte für jedes Feature des L32-Versuch in Abbildung 5.7 zeigt, dass der zu erwartende Komponentenpreis (hier Batteriemodule), die Nachfrage und der Diagnosezustand (hier SoH) den größten Einfluss auf die Klassifizierungsentscheidung gemessen an den Haupteffekten haben.

Für das in der Praxis sehr wichtige Feature des SoH bedeutet dies, dass sich für die Testdaten die Verlässlichkeit des Klassifizierungsergebnisses beim Fehlen der Werte von 80,94% auf 77,81% reduziert. Vor dem Hintergrund dieser geringen Verschlechterung ist dieser Aspekt in zukünftigen Arbeiten näher zu untersuchen, da die aufwendige Bestimmung des SoH beim Batterierecycling auf dieser Weise unter Umständen vermeidbar ist. Darüber hinaus kann festgehalten werden, dass die Verlässlichkeit der Klassifizierungsergebnisse in der Praxis mit einer größeren Anzahl an Trainingsdaten voraussichtlich steigt.

Quantitativ 2: Objekterkennung und Positionswerte

Zur Evaluation der Genauigkeit der Objekterkennung wird das SPU-Modul anhand der 40 Eckschrauben der querverbauten Module validiert. Die TX30 M6x12 Modulschrauben stellen die kleinsten erkennbaren Objekte der Bilderkennung dar und sind somit die am schwierigsten zu detektierende Objektklasse. Es wurden 50 Testframes aufgenommen.

In Abbildung 5.8 ist das Detektionsverhalten des Vision-Moduls für die 50 Testbilder dargestellt. Im oberen Diagramm sind die korrekten Erkennungen (*true positives*, TP), die fälschlicherweise klassifizierte (*false positives*, FP) und die nicht erkannten Schrauben (*false negatives*, FN) aufgetragen. Das untere Diagramm der Abbildung zeigt die daraus folgenden Werte für Recall, Precision und den individuellen AP-Wert (siehe Gleichungen 11 bis 13 in Kapitel 4.3.2). Es ergibt sich für die Detektion der Klasse der TX30 Schrauben eine AP von **80,2%**. Über alle Objektklassen der 50 Testbilder kann eine mAP von **45,1%** validiert werden. Da das verwendete Modell im deutlich größeren COCO-Datenset [239] eine mAP von 37% erreicht, wird das Ergebnis der Objekterkennung vor diesem Hintergrund im Kontext der Batterie als gut bewertet. Im praktischen Experiment zeigt sich, dass vor allem eine starke Beleuchtung für eine hohe Detektionsgüte erforderlich ist.

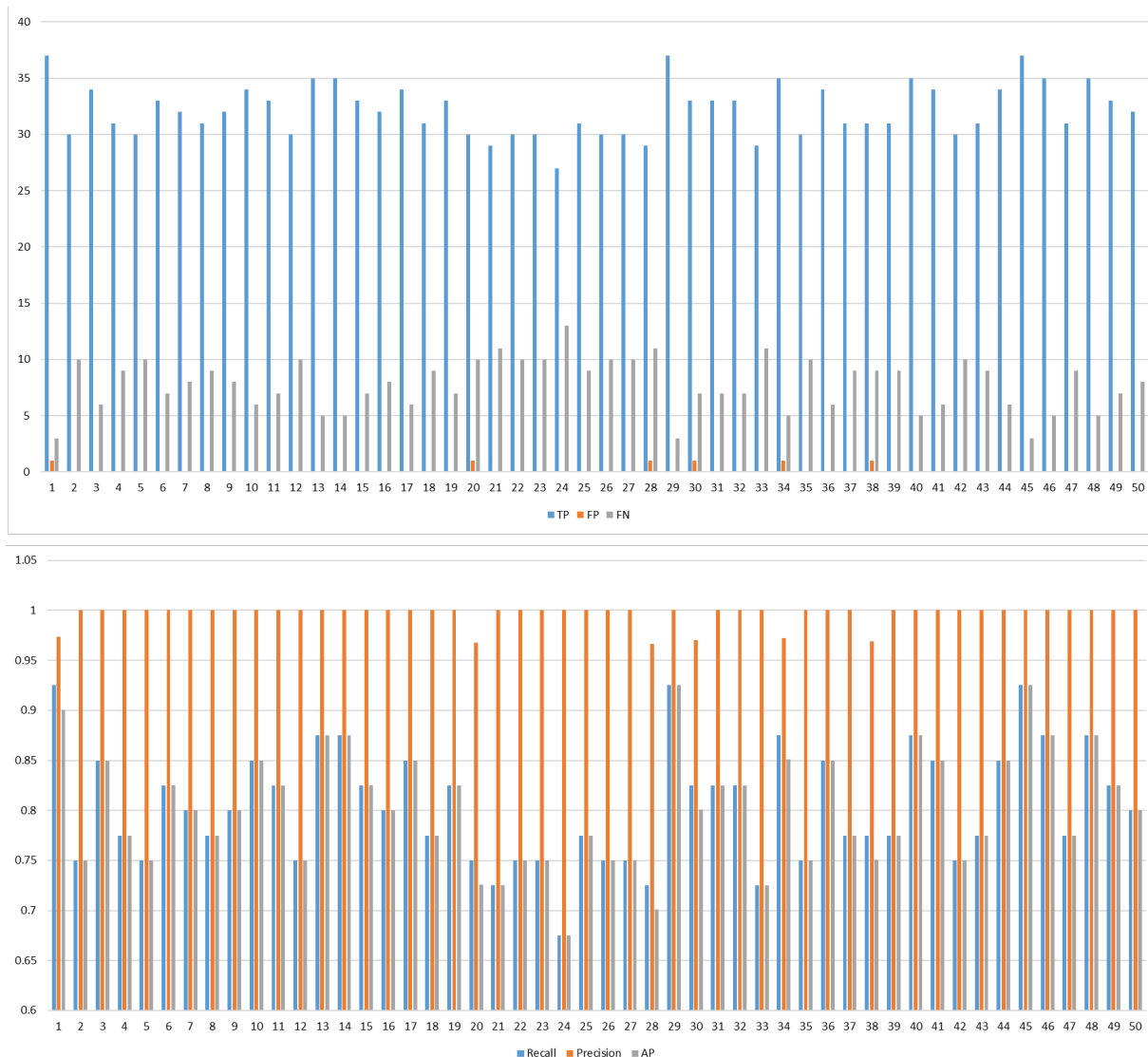


Abbildung 5.8: Auswertung der Anzahl und Genauigkeit von 50 Testframes mit je 40 Schrauben für das SPU-Modul

Für die Auswertung der Positionsgenauigkeit der SPU werden die 50 Testframes aus der Genauigkeitsbestimmung jeweils zwei Mal vermessen, um sowohl Hardware- als auch Auswertungsschwankungen zu berücksichtigen. Es zeigt sich dabei, dass die Auswertungsschwankungen pro Frame deutlich größer sind als die systembedingten Abweichungen, sodass der Algorithmus der SPU so angepasst wird, dass grundsätzlich zwei Lokalisationsprozesse gemittelt werden, um die Objektkoordinaten zu bestimmen.

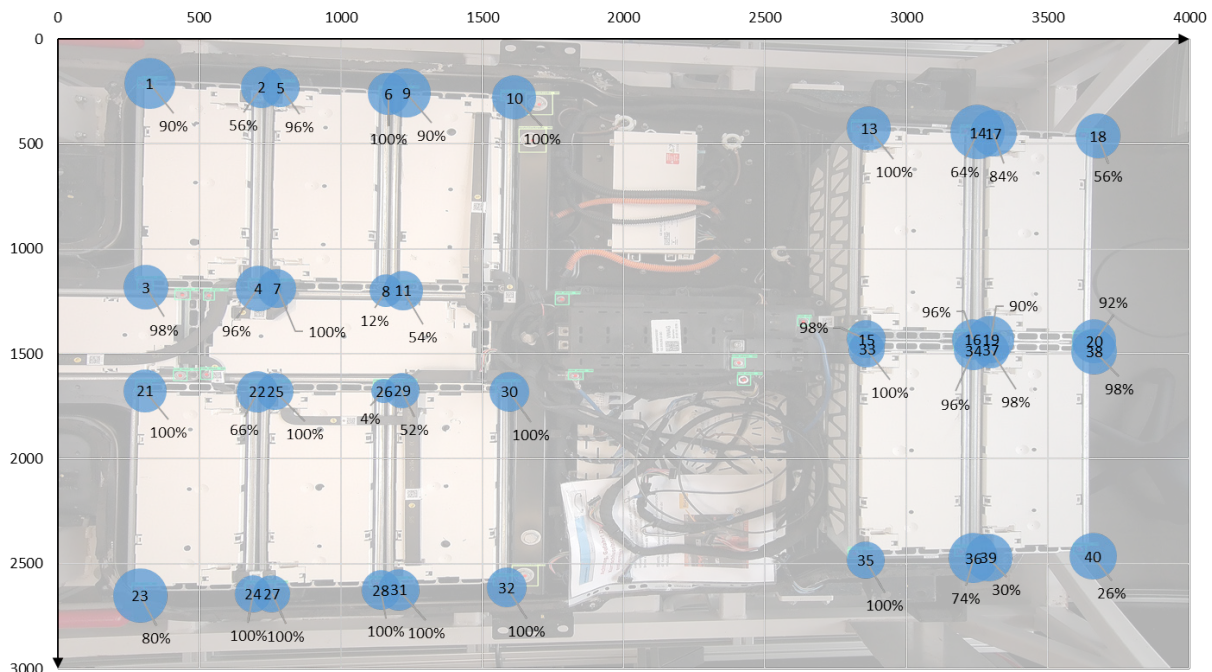


Abbildung 5.9: Auswertung der Positions- und Detektionsgenauigkeit der 40 Modulverschraubungen im Experiment

In Abbildung 5.9 ist das Analyseergebnis für die 40 Modulschrauben graphisch in der X-Y-Ebene der Bildkoordinaten dargestellt. Für jede der 40 Schrauben, angefangen bei dem dem Nullpunkt am nächsten liegenden Modul, wird jeweils die Klassifizierungsrate der *true positives* als Prozentwert sowie die Streuung in Form der Standardabweichung aus den 50 Koordinatenmessungen als um den Faktor 100 vergrößerte Kreise angegeben.

Die Messungen zeigen 0,74 bis 2,34 Pixel Standardabweichung der Positionsmittelwerte. Diese Abweichung wird im Randbereich aufgrund der Krümmungseffekte der Kameralinsen größer (dieser Umstand kann in Abbildung 5.9 an den unterschiedlichen Kreisdurchmessern der Schrauben in der Bildmitte im Vergleich zu den äußeren Schrauben nachvollzogen werden). In der Konfiguration der Demontagezelle entspricht etwa $1\text{ px} = 0,36\text{ mm}$, wobei sich die Werte aufgrund der Kameraoptik ebenfalls zu den Randbereichen hin verändern können. Die größte Streuung in der Positionsmessung des Kamerasystems liegt also maximal bei etwa **0,8 mm** in X- und Y-Richtung für Schraube 23. Bei der Roboterbewegung müssen für die Positioniergenauigkeit zu diesem Wert ebenfalls die Fehler aus der Hand-Auge-Kalibrierung hinzuaddiert werden, die für jeden Kalibriervorgang unterschiedlich ausfallen können.

Kritische Schrauben, wie beispielsweise Schraube 8 und Schraube 26 haben einen niedrigen Detektionswert, da sich im Versuchsaufbau direkt über diesen Schrauben eine starke Lichtquelle befand, die vermutlich durch Reflexionen auf dem Schraubenkopf die Detektion erschwert hat. Schraube 12 wurde nicht erkannt, da ein Teil der Schraube von der Stromschiene des dritten Moduls verdeckt wird. Um diesen Umstand zu verbessern, kann für zukünftige Projekte beispielsweise eine Kombination aus klassischen Bildverarbeitungsmethoden und dem Ansatz tiefer CNN-Architekturen (vgl. [320]) verwendet werden.

Quantitativ 3: Demontageoperationen, Effektivität und Effizienz

Zur Validierung der Demontagefähigkeit des entwickelten Konzeptes soll die automatisierte Demontage im MRK-Szenario für einen Operationsschritt mit der konventionellen manuellen Demontage verglichen werden. Hierbei werden die in Abschnitt 5.2 entwickelten Nullhypothesen in Bezug auf die Effektivität und Effizienz der Konzeptanlage getestet.

Da es im Gesamtablauf des Prototyps, wie im qualitativen Experiment 1 analysiert, zahlreiche individuelle Schritte gibt, soll zur besseren Vergleichbarkeit mit industriellen Prozessabläufen der Fokus dieses Experiments auf der tatsächlichen Demontageoperation liegen. Aufgrund funktioneller Limitierungen im Arbeitsbereich des Roboters wird für 60 Versuchsdurchläufe jeweils ein Modul demontiert. Die ausgeführten Demontageschritte unterscheiden sich nicht für die anderen Quermodule der gleichen Ebene und durch veränderte Schrauben von den Modulen in der unteren Ebene im Heckbereich.

Der Erfolg des Anlagenkonzeptes wird über das Kriterium des Scheiterns definiert: Das Experiment gilt als gescheitert, wenn eine Operationsfolge des Roboters nicht ausgeführt werden kann. Hierbei wird in der Dokumentation jeweils der Grund des Scheiterns mit angegeben. In Bezug auf die Effizienz gilt das Experiment als gescheitert, wenn die gemessene Ausführungszeit ab Programmstart die Vorgabezeit für die manuelle Demontage überschreitet. Es gelten für beide Nullhypothesen die Annahmeintervalle [42; 60] und der Ablehnungsbereich [0; 42] mit einem linksseitigen 95% Konfidenzintervall.

In Tabelle 5.6 ist die Planung der vorbestimmten Zeiten nach der MTM-Grundmethodik für die manuelle Demontage dargestellt. Die erforderliche Zeit für die manuelle Demontage entspricht damit gemäß den vorbestimmten Zeiten nach der *Lowry-Maynard-Stegemerten-Methode* [49] 2154,5 Zeiteinheiten (Engl. *time measurement units*, TMU) bzw. ca. 77,56 Sekunden. Zeitverbesserungen durch Lernverhalten werden hier nicht näher betrachtet, da es sich um eine Arbeitsfolge handelt, die nur im Kontext des Demonstratorszenarios vorkommt. Eine Ausplanung der manuellen Schritte im Rahmen eines Rücknahme- und Verwertungskonzeptes in der Praxis der Seriendemontage kann aufgrund der veränderten Randbedingungen Abweichungen zu diesen Werten zeigen.

Tabelle 5.6: Vorbestimmte Zeiten nach MTM-Planung für die manuelle Demontageoperation

Nr.	Operations-schritt	Körperbewegung	Parameter	Code all-gemein	Code rechte Hand	Code linke Hand	TMU
1	Hinlangen zum Schraubendreher	Reach	Entfernung ca. 50 cm Vermischte Gegenstände		R 50 C		19.6
2	Greifen des Schraubendrehers	Grasp	Auswahlgriff		G 4 A		7.3
3	Prüfen der Modulpositionen	Eye Focus	Standardwerte	EF			7.3
4	Bringen des Schraubendrehers zum Modul	Move	Entfernung ca. 40 cm genaue Positionierung/Lage		M 40 C		18.5
5	Fügen in den Schraubenkopf	Position	Leichter Druck		P2 SS E		19.7
6	Herausdrehen der Schraubverbindung	Screw and Disengage	Ca. 10 Umdrehungen Handschaubwerkzeug		SFS 10 D1		270
7	Wegbewegen des Schraubendrehers	Move	Entfernung ca. 30 cm		M 30 A		12.7
8	Andere Hand zur Schraube bringen	Move	Entfernung ca. 30 cm			M 30 C	15.1

9	Greifen der Schraube (zweite Hand)	Grasp	Auswahlgriff			G 4 A	7.3
10	Trennen von Schraube und Modul	Disengage	lose			D1	4
11	Bringen der Schraube in Ablagebehälter	Move	Entfernung ca. 50 cm ungefähre Lage			M 50 B	18
12	Loslassen der Schraube	Release	Öffnen der Finger			RL 1	2
13	Prüfen der Demontagefolge auf HMI	Eye Focus Eye Travel	Standardwerte	EF ET			27.3
14	Wiederholung 3-12		Schraube 2				363.9
15	Wiederholung 13-14		Schraube 3				391.2
16	Wiederholung 13-14		Schraube 4				391.2
17	Wegbewegen des Schraubendrehers	Move	Entfernung ca. 50 cm ungefähre Lage		M 50 B		18
18	Loslassen des Schraubendrehers	Release	Öffnen der Finger		RL 1		2
19	Hinlangen zum Modul	Reach	Modulposition bekannt, beide Hände nutzen	R 50 A			13
20	Greifen des Moduls	Grasp	jede Hand		G 4 A	G 4 A	14.6
21	Transport zur Ablagestelle mit Nachgreifen	Move Turn Walk Grasp Turn	An den Körper bewegen Drehen Mit Last zur Ablagestelle gehen 15 Schritte Drehen	M 20 B T 45 L W 15 PL G2 T 45 L			297.5
22	Ablagestelle prüfen	Eye Focus	Standardwerte	EF			7.3
23	Modul loslassen	Release	Öffnen der Finger		RL 1		2
24	Rückkehr Ausgangsposition	Walk	ohne Last	W 15 P			225
GESAMT TMU							2154.5

Für die Demontage im Anlagenkonzept werden die Zeiten des Schraubprozesses mit dem Roboter aufgenommen und die Prozessanteile ausschließlich menschlicher Tätigkeiten aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit ebenfalls mit der MTM-Methodik bestimmt. Hier ergeben sich für das Entfernen der Schrauben und den Transport des Moduls an die Ablagestelle 21,27 Sekunden Vorgabezeit.

Die Auswertung der 60 Versuchsdurchläufe für die Demontage ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte des automatisierten Prozesses durch die geringen Abweichungen im Schraubprozess bis auf wenige Ausnahmen in einem sehr engen Zeitbereich liegen. Der arithmetische Mittelwert liegt bei **61,68 Sekunden** mit einer Standardabweichung von 0,38 Sekunden. Alle Versuchsdurchläufe liegen damit bezogen auf die Effizienzgrenze unterhalb des Wertes für die manuelle Demontage, was bedeutet, dass keiner der Durchläufe in Bezug auf dieses Ziel gescheitert ist. Die Nullhypothese der Effizienzvermutung für das Systemkonzept wird damit angenommen.

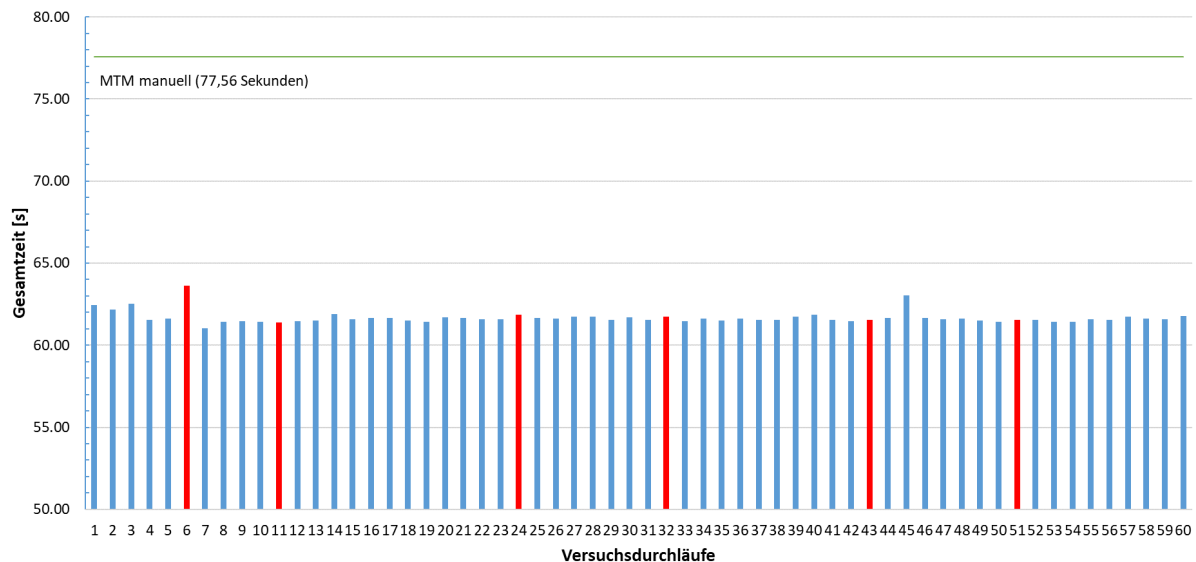


Abbildung 5.10: Auswertung der Demontageversuche (rote Säule entspricht einem Fehlschlag)

In Bezug auf das Effektivitätskriterium konnten 54 Durchläufe erfolgreich ausgeführt werden. Der automatisierte Demontageprozess ist sechsmal gescheitert: Dreimal wurde während des Schraubprozesses die Schraubverbindung nicht vollständig gelöst und es waren manuelle Schraubtätigkeiten bei jeweils einer Schraube nötig. In zwei Fällen ist der Roboter an der Zielkoordinate mit dem Anfahralgorithmus nicht in den Schraubenkopf eingeführt worden. Durch die Drehbewegung und die Axialkraft in Z lief der Bit des Schraubers auf dem Schraubenkopf aus dem Mittelpunkt heraus und rutschte von der Schraube ab. In einem Fall konnte das Werkzeug kein ausreichendes Drehmoment aufbringen, um die Schraube zu demontieren. Insgesamt befindet sich die Anzahl der erfolgreichen Versuchsdurchläufe im Annahmebereich der Nullhypothese für das Effektivitätskriterium.

Die eingesetzte Sinusschwingung im Anfahrprozess hat sich in den Versuchen als praktikabler erwiesen als ein Spiralprozess, da bei den geringen Abständen zwischen den Schrauben und den relativ hohen Genauigkeitswerten der Positionskoordinaten die Prozesszeit verkürzt werden kann. Darüber hinaus kann die Schwingung um die Z-Achse die Schraube durch das aufgebrachte Moment bereits im Anfahrprozess leicht vorlösen. Beim Einsatz dieser Methode sind aufgrund der Programmierung als kraftangeregte Federschwingung die genaue Bestimmung der Werkzeugmasse und deren Trägheit enorm wichtig, um prozesssichere Ergebnisse zu erzielen.

In Bezug auf den Wirtschaftlichkeitsaspekt, im Vergleich zwischen manueller und MRK-Demontage, spielt die Berechnung der Kosten nach Formel 1 eine wichtige Rolle. Da der Roboter nur den Fixkostenanteil steigert und die manuellen Kosten nur vom Personalkostensatz und dem Zeitanteil abhängen, ist es wahrscheinlich, dass sich eine wirtschaftliche Analyse eines realen Demontageprozesses nach dem roboterunterstützten Konzept verbessert, da bei gleichen Personalkosten (z. B. einem Mitarbeitenden) sowohl geringere Gesamtzeiten pro Komponente erzielt werden können sowie eine Parallelisierung der Demontageoperationen zwischen Mensch und Roboter möglich ist (in diesem Versuch wären nur die 21,27 Sekunden manueller Tätigkeit pro Modul erforderlich, die nahezu zweimal innerhalb der Zeit des Schraubprozesses ausgeführt werden können). Eine genaue Analyse der Kosten muss bei der Implementierung in Abhängigkeit von Produkt und Unternehmen durchgeführt werden.

Beide Hypothesen werden aufgrund des erfolgreichen Versuchsergebnisses am Prototypen angenommen. Das entwickelte Konzept ist damit in Bezug auf eine Steigerung der möglichen Effizienz bei gleichwertiger Effektivität validiert.

Quantitativ 4: Werterhalt und Recyclerl s im Modell

Zur Bestimmung der Auswirkungen des RCP-Prozesses auf den möglichen Werterhalt werden für die 320 Samples aus dem Experiment zur Untersuchung des Klassifizierungsverhaltens die möglichen Erlöse für verschiedene Entscheidungsszenarien verglichen. Die Szenarien stellen dabei den Fall monodirektionaler Verwertungsketten dar, in denen entweder 100% der Produkte einer Aufarbeitung oder dem stofflichen Recycling zugeführt werden (Szenario 1 und Szenario 2). Ein Szenario 3 betrachtet den Fall der Entscheidung gegen eine Demontage. Eine wichtige Fallunterscheidung ist die unternehmensseitige Zuordnung des Demonteurs. Hier soll zwischen dem Fall „OEM“ bei dem die Cores zur Verwertung bereits vorhanden sind und dem Fall „freier Betrieb“ unterschieden werden, der die Cores über einen Broker zu Marktpreisen erwerben muss. Berücksichtigt werden die Beschaffungspreise, die Demontagekosten, die zu erwartenden Erlöse der Komponentenweiterverwendung und die perspektivischen Erlöse des stofflichen Recyclings.

Für die verschiedenen Szenarien ergeben sich die folgenden Ergebnisse (Tabelle 5.7):

Tabelle 5.7: Wirtschaftliche Auswertung der 320 Testsamples für die Szenarien (Werte in  )

Fall	RCP	Referenz	Optimum	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
OEM	333.097	275.990	407.113	250.716	90.508	361.468
Freier Betrieb	-28.371	-85.478	45.454	-110.752	-270.960	0

Die Betrachtung zeigt, dass ein durchgehend wirtschaftlicher Betrieb der automatisierten Demontage mit dem hier gezeigten Konzept nur im Fall des OEM ohne zusätzlichen monetären Beschaffungsaufwand für die Cores möglich ist. Im Fall des freien Betriebes führen die hohen Core-Preise dazu, dass viele Prozesse bilanziell unrentabel werden. Das theoretische wirtschaftliche Optimum ist zwar positiv, wird aber weder durch die individuellen RCP-Entscheidungen noch im Falle übergreifender Verwertungsziele für den Fall des freien Betriebs erreicht. Im Szenario 3 zeigt der Fall OEM das Ver u erungspotenzial der Cores, wohingegen der freie Betrieb in diesem Szenario keine Tätigkeiten ausführt. Eine Beantwortung der Frage, ob eine individuelle Entscheidung mittels RCP nachhaltiger sei, als die Entscheidung über den gesamten Produktumfang, kann aus diesem Experiment heraus nur mit der Einschränkung beantwortet werden, dass von den drei Zieldimensionen der Nachhaltigkeit nur die ökonomische Komponente quantitativ evaluiert werden kann. Die ökologische und soziale Bewertung der Entscheidung kann im Rahmen dieser Arbeit nicht objektiv beantwortet werden, da für die Beispielbauteile und Prozesse keine Äquivalenzwerte verfügbar sind. Die ökologische Dimension kann qualitativ auf Basis der Verwertungshierarchie für die Szenarien mit angegeben werden. Im Vergleich der RCP-Ergebnisse mit der manuell klassifizierten Referenz zeigt sich, dass das RCP-Modell seine Entscheidungsergebnisse stärker an der Wirtschaftlichkeit des Prozesses orientiert. Im Verhältnis zum theoretischen wirtschaftlichen Optimum erreicht das RCP im OEM-Fall **81,8%** des Maximalwertes. Ferner ist die individuelle Entscheidung in allen Fällen und beiden Demontageszenarien besser als eine durchgängige Entscheidung für ein bestimmtes Verwertungsziel. Dies bestätigt die Zielformulierung, den Gesamtprozess durch individuelle Entscheidungen zu verbessern. Dieses Ergebnis sichert die ökonomische Dimension der Fragestellung ab. Der ökologische Wert der RCP-Entscheidung ist geringer als das Szenario 1 mit maximalem Werterhalt der Funktionsbaugruppen, jedoch höher als für ein reines Recycling. Der Vergleich der Szenarien 1 und 2 zeigt hier, dass der Werterhalt von Komponenten eine zentrale Rolle auf dem Weg hin zu einer realisierbaren Kreislaufwirtschaft spielt, da sich über diese Prozesspfade höhere Erlöse erreichen lassen als über das stoffliche Recycling. Auch sind die ökologischen Folgen dieser höheren Verwertungsstufen in jedem Fall vorzuziehen.

Quantitativ 5: MRK-Sicherheitseinrichtung

Für die Evaluation werden in einer definierten Roboterbewegung zwischen zwei 1000 mm entfernten Punkten mit einer Geschwindigkeit von 250 mm/s mit jeweils zehn Wiederholungen Eingriffe in den Arbeitsbereich aus allen Bildrichtungen und in Kombination mit Störgrößen ausgeführt. Die Gesamtzahl an Versuchsdurchläufen beträgt 120 Durchgänge. Die Verlangsamung wird bei ca. 500 mm Abstand geprüft und der Halt bei etwa 190 mm entsprechend der Grenzen des Prototypen aus Abschnitt 4.5.

Das Ergebnis der Untersuchung der Sicherheitseinrichtung in Abbildung 5.11 zeigt, dass das prototypische System insgesamt nur für den direkt trainierten Fall ohne Störgrößen eine ausreichende Sicherheit für den industriellen Einsatz bietet. Während hier noch akzeptable Ergebnisse von bis zu 100% erzielt werden, nimmt die Verlässlichkeit mit abnehmender Distanz zur Kamera und unter Einbezug der Störgrößen ab. Eine Ausnahme stellt der Fall *Hand mit Handschuh und Werkzeug* bei Prüfung auf *Verlangsamung* dar. Hier ist das Ergebnis mit einer Zuverlässigkeit von bis zu 80% (Mittelwert 60%) besser als für das Szenario *Hand mit Handschuh* (Mittelwert 55%). In Bezug auf die trainierten Körperteile ist insgesamt eine sichere Erkennung bis zu einem Mindestabstand von etwa 300 mm in 100% der Fälle möglich. Darunter ist das Sichtfeld der Kamera zu klein, um ausreichende Teile der Hände zu erkennen.

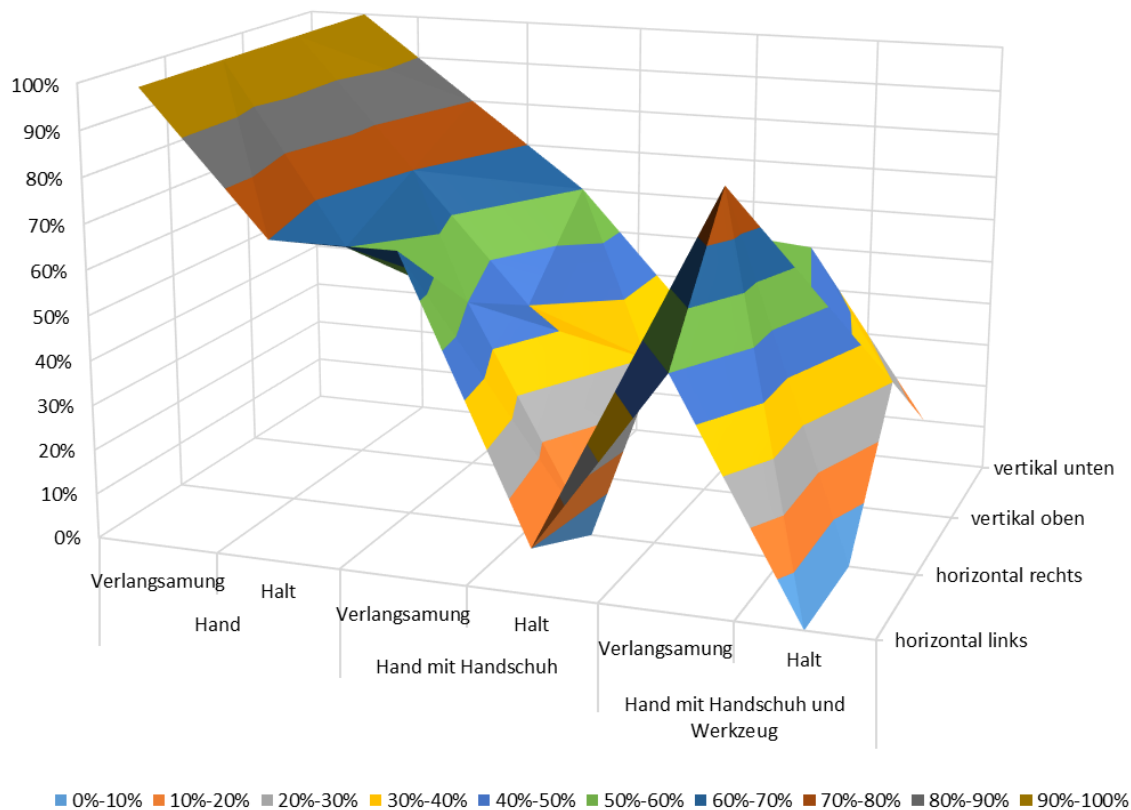


Abbildung 5.11: Auswertung der MRK Sicherheitseinrichtung

Das Prinzip wird damit für den Prototyp und das Trainingsset bestätigt. Die Generalisierungseigenschaften des CNN-Modells sind ohne Trainingsdaten, die mit den Objekten *Handschuh* und bzw. *Handschuh und Werkzeug* gelabelt wurden, nicht ausreichend. Für die trainierten Hände jedoch ergibt sich eine Sicherheit von 100% in der Erkennung bei der ersten Distanzstufe. Für den praktischen Einsatz sollte daher ein industrielles Bildverarbeitungssystem mit auf den Anwendungsfall angepasster Optik (Sichtfeld) und einem größeren Trainingsdatensatz eingesetzt werden, um die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen an eine MRK-Anwendung im Rahmen der Performance Level für Kamerasysteme nach DIN 13849 [271] zu erfüllen.

5.4 Fazit: Zielerreichung in Bezug auf die Anforderungen

Ein Modell kann immer nur eine Annäherung an reale Prozesse und Verhältnisse darstellen. In dieser Arbeit wurde auf Grundlage des technischen Standes im Bereich der Demontageautomatisierung ein Systemkonzept entwickelt, welches eine Antwort auf die Frage nach einer ganzheitlichen Prozessverbesserung im Sinne einer nachhaltigen Zielsetzung durch Schließung der Informationslücken im Demontageprozess beantwortet. Die Verwendung von künstlicher Intelligenz, Industrie 4.0 Konzepten zur Interoperabilität und die Implementierung eines MRK-Robotersystems zur Umsetzung des auf Basis der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 entwickelten Prozessentwurfs sind in diesem Kapitel anhand der Output Charakteristik der Prototypenanlage mit Fokus auf der Untersuchung der festgelegten Forschungshypothesen betrachtet worden. Die Übersicht der Ergebnisse der Versuchsauswertung in Bezug auf die zu untersuchenden Fragestellungen im entwickelten Experimentalszenario sind in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Zielerreichung in Bezug auf die Primärfragestellungen

Fragestellung	Hypothese	Versuch	Ergebnis
Kann die durchgängige Informationsweitergabe umgesetzt werden?	H ₁	Qualitativ 1	positiv
Ist ein kompletter Datenumlauf über das Einlesen des externen Produktdatensatzes, den Demontageprozess und die Rückgabe von validen Prozessinformationen möglich?	H ₁	Qualitativ 1	positiv
Ist das Kapazitäts- und Datenstrommanagement ausreichend?	H ₁	Qualitativ 1	positiv
Ist das Informationsmodell standardisiert und herstellerübergreifend umsetzbar?	H ₁	Konzept	positiv
Wie reagiert die Steuerung auf unvollständige Informationen?	H ₁	Quantitativ 1	positiv
Wie verlässlich ist eine Verwertungsentscheidung?	H ₂ , H _{2.1}	Quantitativ 1	positiv
Lassen sich alle Nachhaltigkeits-Dimensionen im Entscheidungsmodul berücksichtigen?	H ₂ , H _{2.1}	Qualitativ 2	positiv
Kann das Objekterkennungssystem Objekte sicher differenzieren? Wie zuverlässig ist das System für kleine Bauteile?	H ₂ , H _{2.1}	Quantitativ 2	positiv
Wie aufwendig ist das Erlernen der Detektionsfähigkeit neuer Komponenten?	H ₂ , H _{2.1}	Qualitativ 3	positiv
Verbessert das Konzept die Prozesseffektivität?	H ₃	Quantitativ 3	positiv
Verbessert das Konzept die Prozesseffizienz?	H ₃	Quantitativ 3	positiv
Ist die produktindividuelle Planungsautonomie im Kontext industrietüblicher Taktzeitkonzepte realistisch?	H ₃	Qualitativ 1	positiv
Ist die individuelle Entscheidung nachhaltiger als eine allgemeine Entscheidung?	H ₃	Quantitativ 4	positiv
Wie verlässlich ist das Sicherheitskonzept der MRK?	H ₃	Quantitativ 5	positiv
Ist die Assistenzfunktion der MRK zielführend?	H ₃	-	k. A.

Die Auswertung zeigt, dass das Systemkonzept in der Lage ist, die gestellten Anforderungen hinsichtlich der Forschungshypothesen zu erfüllen.

In Bezug auf die Hypothese H_1 kann die Sekundärfrage der Durchgängigkeit positiv beantwortet werden. Ein praktisches Erfordernis im Datentransfer stellt jedoch die Konvertierung der Datensätze im RCP dar. Innerhalb des Prozessablaufs ist ein Parser in ein für die KI lesbares Format (CSV-Datei) notwendig. Dieser Umstand hat jedoch keine Auswirkungen auf den durchgängigen Informationsaustausch, da die Konvertierung ohne Informationsverlust in nahezu Echtzeit abläuft. Wichtige Voraussetzung hierfür ist, dass der Datensatz pro Komponente auch Strukturinformationen enthält, die auf diese Weise mit extrahiert werden können. Wäre das OPC-Informationsmodell nur auf die Abbildung realer Eigenschaften beschränkt, könnten diese strukturellen Informationen nicht in die Entscheidung einfließen und es entstünde ein Nachteil für das Konzept. Der vollständige Informationsumlauf konnte unter geringer Netzwerkauslastung implementiert werden, was für eine gute Skalierbarkeit in Implementationszenarien mit mehreren Anlagen spricht. Die bidirektionale Kommunikation und die Weitergabe von validem Prozesswissen wurde im Szenario der prototypischen Batteriemodul-Demontage positiv nachgewiesen. Die Standardisierung der Systemkommunikation ist durch die konzeptseitige Auswahl von OPC-UA als Interoperabilitätsframework aus der Industrie 4.0 sichergestellt und erlaubt damit den Einsatz und die Einbindung in kreislaufwirtschaftliche Prozesse ohne einen informationstechnischen Bruch zwischen Produktion und Verwertung. Das quantitative Experiment zum Entscheidungsverhalten zeigt, dass die Verarbeitung unvollständiger Datensätze eine vom jeweils fehlenden Faktor abhängige Auswirkung auf die Verlässlichkeit und Qualität des Gesamtergebnisses hat. Hierbei sind vor allem Faktoren mit wirtschaftlichem Informationsgehalt von Bedeutung. Für den im Batterierecycling wichtigen Wert SoH konnte gezeigt werden, dass ein Fehlen nur eine geringere Verschlechterung des Entscheidungsergebnisses bewirkt. Diese Erkenntnis kann in der Praxis genutzt werden, beispielsweise zur Entwicklung von Diagnosemethoden für EoL-Traktionsbatterien ohne die oft kostspielige und technisch aufwendige Bestimmung des SoH.

Es wurde damit innerhalb des Konzeptes ein durchgängiges Informationsmanagement implementiert, welches es ermöglicht einzelne Akteure der Kreislaufwirtschaft bis hin zu Fertigungsebene einer Demontagezelle zu verknüpfen und bidirektional Produkt- und Prozessinformationen auszutauschen. Die Hypothese H_1 wird deshalb angenommen.

Die zweite Forschungsperspektive dieser Arbeit richtet sich mit den Hypothesen H_2 und $H_{2.1}$ an das autonome Entscheidungsverhalten einer innerhalb des Informationsmanagement-Systems befindlichen Einheit, in diesem Fall durch das RCP im Konzept repräsentiert. Im ersten quantitativen Experiment konnte die Verlässlichkeit der Entscheidungen durch das System mit über 82% in Bezug auf die Demontageentscheidung bestätigt werden, wenn auch für eine zuverlässige Bestimmung der Referenzentscheidungen keine sichere Aussagefähigkeit nachgewiesen werden konnte. Das Experiment zum Welterhalt zeigt jedoch, dass die tatsächliche Entscheidung des Systems wirtschaftlich bessere Ergebnisse als der Referenzsatz liefert. Hier sind in der Praxis weitere Untersuchungen mit einer größeren Menge Trainingsdaten notwendig. Die Entscheidung des Systems berücksichtigt dabei grundsätzlich Faktoren, die alle Zieldimensionen der Nachhaltigkeit repräsentieren. Eine Korrelationsanalyse mit den Klassifizierungsergebnissen für den Referenzdatensatz hat dabei gezeigt, dass grundsätzlich alle signifikanten Faktoren eine der Nachhaltigkeitsdimensionen beinhalten, wobei die soziale Zieldimension nur vom diesbezüglichen Bewertungsfaktor angesprochen wird. Die stärkste Auswirkung auf das Entscheidungsergebnis haben ökonomisch relevante Faktoren.

Für die Arbeit in komplexen und unbekannten Umgebungen ist darüber hinaus auch die Verlässlichkeit des Bilderkennungssystems der SPU von Relevanz. Die sichere Differenzierung zwischen Objekten und die Fähigkeit zur Erkennung kleiner Objekte wurde im zweiten quantitativen Experiment überprüft. Eine mAP mit 45,1% und eine mittlere Präzision pro Bild mit über 80% zeigen, dass mit einer für das verwendete KI-Modell sehr hohen Genauigkeit auch für sehr kleine Objekte gearbeitet werden kann. Der Aufwand für neue Objekte kann durch Transfer-Learning reduziert werden. In einem praktischen Versuch hat sich gezeigt, dass ebenfalls der Umfang an Trainingsschritten verkleinert werden kann, wobei trotzdem stabiles Modellverhalten erreicht wird. Die Perspektive des Trainings mittels CAD-Modellen muss in zukünftigen Untersuchungen weiterentwickelt werden, birgt aber auch hier weiteres Verbesserungspotenzial (vgl. [249]).

Die Verwertungswege individueller Komponenten können damit in Abhängigkeit der verfügbaren Informationen und des tatsächlichen Zustandes entschieden werden. Der RCP ist in der Lage, Daten aus externen Quellen mit visuellen Informationen zu verknüpfen und autonome Entscheidungen zu treffen. Dies bestätigt die Hypothese H_2 . Der Zielaspekt der Nachhaltigkeit wird durch den Einbezug relevanter Faktoren in das Entscheidungsergebnis berücksichtigt. Dabei sind vor allem ökonomische Faktoren und ökologische Aspekte in Bezug auf eine möglichst werterhaltende Verwertungsoption wichtig. Damit wird die Hypothese $H_{2.1}$ grundsätzlich angenommen, wobei jedoch das Fehlen praxisbezogener Faktoren der sozialen Zieldimension das Ergebnis für holistische Nachhaltigkeitsperspektiven weniger belastbar macht.

Praktische Untersuchungen am Beispiel der Moduldemontage zeigen, dass das entwickelte Konzept unter Berücksichtigung von Übertragungs- und Verarbeitungszeiten im Rahmen einer MRK-Operation das Demontageergebnis gegenüber klassisch-manuellen Vorgehensweisen sowohl in Bezug auf Effizienz als auch in Bezug auf die Effektivität gemäß den Testhypothesen aus dem dritten quantitativen Versuch verbessert. Eine auf produktindividuellen Entscheidungen basierende Planungsautonomie des Systems stellt dabei die Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Zieldimensionen sicher. Die Planung der Prozessschritte ist dabei mit weniger als 5 Sekunden in einem Bereich, der den Einsatz derartiger Konzepte auch innerhalb von industriellen Taktzeitvorgaben erlaubt. Das Sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitskonzept der MRK-Demontage wurden in den Laborbedingungen positiv bestätigt. Die Hypothese H_3 wird somit insgesamt auf Basis der Versuche angenommen.

Die aus der allgemeinen Fragestellung dieser Arbeit abgeleiteten Hypothesen lassen sich durch die experimentelle Validierung nicht widerlegen. Der Beitrag zu einer ganzheitlichen Verbesserung des Recyclingprozesses durch die Automatisierung der Demontage im Kontext der Schließung der Informationslücke kann somit durch das in dieser Arbeit dargelegte Konzept geleistet werden, womit die Forschungsfrage beantwortet ist.

Mit der Umsetzungsvalidierung ist die methodische Heuristik des Forschungsvorhabens aus Abschnitt 3 abgeschlossen. Die Güte einer Heuristik kann durch den Vergleich mit einer bekannten, optimalen Lösung ermittelt werden. Da im Bereich der Demontage bislang keine vergleichbaren Lösungen existieren, kann die Bewertung des Konzeptes nur vor dem Hintergrund einer praktischen Implementierung endgültig validiert werden. Die Grenzen der Evaluation liegen dort neben den Einflüssen durch die durchführenden Personen in der Möglichkeit technischer Fehlfunktionen der Geräte, die hier jedoch nicht näher untersucht wurden.

6 Integrationspotenzial in reale Demontageumgebungen und angrenzende Industriebereiche

Wie kann das entwickelte Konzept in eine reale Demontage integriert werden und welche Anforderungen müssen dafür erfüllt sein? Nach einer allgemeinen Zusammenfassung der Integrationsanforderungen und Potenziale der Systemmodule wird in diesem Kapitel das Beispiel der Batteriedemontage als naheliegender Anwendungsfall näher betrachtet. Abschließend werden Möglichkeiten zur (Teil-)Integration in andere Industriebereiche vorgestellt.

Eine generalisierte Methodik kann immer nur als Fundament für die Entwicklung einer konkreten Lösung im industriellen Maßstab dienen, da vor allem wirtschaftliche Faktoren ausschlaggebend für die erfolgreiche Implementierung sind. Das im Rahmen des Forschungsprojektes entworfene Framework (vgl. [32]) ist eine wichtige Voraussetzung, um den Informationsbedarf einer Anlage entsprechend der hier postulierten Methodik zu decken. Das Konzept selbst ist dank der Grundlage einer standardisierten, stakeholderübergreifenden Methodik zum Informationsmanagement in der Einsatzabstimmung weniger komplex als beispielsweise bei *Vongbunyong* [76], da die Datenintegration den Anpassungsaufwand der Ablaufplanung deutlich reduziert. Der RCP ist in der Lage, die zentral verfügbaren Daten bauteilindividuell mit sensorischen Inhalten zu verknüpfen und auf Grundlage dessen eine verlässliche Entscheidung bezüglich der Demontagetiefe des Produktes zu treffen. Die Sequenzplanung ist basierend auf einer einfachen Bewertungsheuristik aufgebaut, in der die Demontagematrix mit den Informationen über die Vorrangrelationen der Bauteile mit der Verwertungsentscheidung und der hierarchischen Tiefe der jeweiligen Komponente eine Bewertungsreihenfolge nach skalarem Zielerreichungswert ermöglicht. Dies ist nur möglich, da die Demontageentscheidung auf Grundlage der Bewertungsdimensionen des Bauteils bereits vorab getroffen wurde und da die Produkte in der Praxis pro Baugruppe endliche Mengen an Teilen enthalten, die im Rahmen des exponentiell steigenden Berechnungsaufwands praktisch noch handhabbar sind. Die Entscheidungen des Systems können sich mit einer größeren Menge an Samples auch verändern und so an wechselnde Umweltbedingungen anpassen. Die SPU trägt in dem System dazu bei, in der Demontage eine erste tatsächliche Zustandsbewertung der Produkte vorzunehmen. Darüber hinaus werden die vorher trainierten Komponenten vom System erkannt und es ist möglich, deren Positionen an die DEU weiterzugeben. Auch für die Sicherheitsfunktionen der MRK bietet die SPU zusätzliches Potenzial. Mit der DEU werden die Demontageoperationen umgesetzt. Die Steuerungsvorgaben kommen dabei über den RCP. Eine erfolgreiche Demontage wird aufgezeichnet und kann im Rahmen des Datenmanagements an die zentrale Datenbasis zurückgegeben werden. Das Werkzeugmanagement beschränkt sich in dem hier entwickelten Konzept auf eine Schrauberlösung, die zwar vollständig in das Informations- und Steuerungskonzept integriert ist, sich aber in der Praxis auf eine Operation beschränken muss.

In Tabelle 6.1 ist eine Übersicht der Systemmodule und der Konzeptvorgaben bezüglich der Kommunikationsanforderungen dargestellt. Hierbei werden sowohl die Anforderungen an eine praktische Integration als auch die daraus für die Industrie hervorgehenden Potenziale genannt.

Tabelle 6.1: Integrationsanforderungen nach Modulen

Komponente	Aspekt	Integrationsanforderung	Potenzial
Konzept	Standardisierter Datenaustausch und Strukturkonzept	Abstimmung der Stakeholder in der Kreislaufwirtschaft und Einigung auf gemeinsame Regeln	Bewertung: <i>hoch</i> Grundvoraussetzung einer informationsbasierten Kreislaufwirtschaft

Konzept	Informationsmarkt- platz	Strukturelle Verknüpfung der Stakeholder und faire Han- delsprinzipien in Bezug auf Preis und Datenqualität	Bewertung: <i>hoch</i> Erlaubt den Austausch zwischen Stakeholdern mit einem Anreizsystem
RCP	Datensynthese	Standardisierte Ontologie und Umsetzung des Daten- austauschkonzeptes	Bewertung: <i>mittel</i> Erlaubt die Erweiterung von Lebenszyklusdaten durch Konkatenation
RCP	Entscheidungspro- zessor	Produktindividueller Daten- satz von möglichst hoher Dichte in einem automatisch lesbaren Format	Bewertung: <i>hoch</i> Vorteile in allen Zieldi- mensionen durch produkt- individuelle Entscheidung
RCP	Lernprozess	Ausreichende Menge an teil- nehmenden Stakeholdern und kontinuierlicher Zugang zu den relevanten Daten	Bewertung: <i>mittel</i> Erlaubt die Anpassung der Entscheidungen an Marktveränderungen
RCP	Autonome Sequenz- planung	Vorrangrelationen aus Struk- turinformatoren und Ent- scheidung bezüglich der Ver- wertungsziele, nicht für un- begrenzt große Baugruppen	Bewertung: <i>hoch</i> Ermöglicht die Umset- zung einer autonomen, produktindividuellen De- montage
SPU	Identifikation	Komponenten müssen struk- turell angelegt sein und die Bildererkennung muss anhand von Beispielen oder CAD- Daten trainiert werden	Bewertung: <i>hoch</i> Erlaubt Prüfung auf Vor- handensein und Zuord- nung von Eigenschaften und Aktionen
SPU	Detektion	Installation und Kalibrierung eines geeigneten Kamerasys- tems	Bewertung: <i>mittel</i> Validierung von Bauteil- positionen, falls Daten nicht verfügbar sind
SPU	Bewertung	Referenzobjekte mit klassifi- zierbaren Beschädigungen, Software zur Verknüpfung mit der SPU Funktion	Bewertung: <i>mittel</i> Die statischen Daten kön- nen um reale Bewertun- gen ergänzt werden
SPU	Arbeitsraumüberwa- chung	Anschaffung industrietaugli- cher, zertifizierter Systeme	Bewertung: <i>niedrig</i> Verbesserung der MRK- Fähigkeit
DEU	Robotersystem	Kompatibilität mit OPC Companion Specification, Wirtschaftlichkeit	Bewertung: <i>mittel</i> Möglichkeit zur Automa- tisierung
DEU	Werkzeugsystem	Informationen über Verbin- dungsarten, Wechselsystem für Endeffektoren	Bewertung: <i>hoch</i> Automatisierung nur mit flexiblen Werkzeugen
DEU	HMI	Verknüpfung mit Informati- onssystem und Anlagensteu- erung, Gebrauchstauglichkeit	Bewertung: <i>mittel</i> Bewirkt eine höhere Ef- fektivität bei MRK

Eine Bewertung des tatsächlichen Aufwands der Integrationsanforderungen bedarf einer weiteren Untersuchung für eine geschlossene Wertschöpfungskette eines Pilotproduktes mit allen Teilnehmern entlang der Kreislaufwirtschaft und kann deshalb nicht explizit vorgenommen werden. Es ist jedoch möglich, die einzelnen Aspekte zueinander ins Verhältnis zu setzen und das jeweilige Potenzial der Integration in ein reales Demontageumfeld qualitativ zu bewerten.

Grundlage aller Funktionen des entwickelten Konzeptes stellt ein übergeordnetes Datenmanagement dar. Eine standardisierte Modellstruktur, die den Austausch zwischen unterschiedlichen Stakeholdern für verschiedene Informationsinhalte ermöglicht, muss bereits bei der Fertigung der Produkte angelegt werden, um ein digitales Abbild der Produkt- und Lebenszyklusdaten darzustellen. Einige Inhalte sind zwar im Prozess durch optische Analyse oder einen Anlernprozess ausgleichbar, jedoch muss immer ein gewisser Grad an Grundinformation zum zu demontierenden Produkt vorliegen, damit der Prozess erfolgreich durchgeführt werden kann. Damit diese Daten, die grundsätzlich an verschiedenen Stellen des Lebenszyklus entstehen, ausgetauscht werden können, ist eine Plattform erforderlich, die diesen Transfer ermöglicht. Da jedoch ohne einen Anreiz kein Teilnehmer der Kreislaufwirtschaft zusätzlichen Aufwand für ein solches System einbringen wird, muss ein monetärer Ausgleich in Form des Marktplatzkonzeptes die Grundlage für den Datenaustausch darstellen, sofern keine legislative Lösung eingeführt werden soll. Sind diese Bedingungen erfüllt oder es handelt sich um einen OEM, der bereits über einen Großteil der Daten verfügt, können die Module und Funktionen der Demontageeinheit implementiert werden.

Der RCP stellt das wichtigste Modul in Bezug auf die Potenziale der Funktionsintegration dar. Die Entscheidung über die EoL-Verwertungsoption innerhalb des Demontageprozesses auf Basis produktindividueller Daten ermöglicht die Optimierung der gesamten Verwertungskette ab dem ersten Prozessschritt in Abhängigkeit der möglichen Optionen und unter Berücksichtigung der Zieldimensionen der Nachhaltigkeit. Notwendig ist hierfür die Verfügbarkeit der Daten auf Grundlage des Datenmanagement-Konzeptes. Eine hohe Bewertung für die Demontage hat darüber hinaus die auf dem Entscheidungsprozessor aufbauende Sequenzplanung. Diese lässt ein Demontagesystem autonom arbeiten, sofern alle Anforderungen zur Ausführung der Operationen durch das Werkzeug- und Handhabungssystem erfüllt werden. Darüber hinaus kann die optimierte Verwertungsentscheidung für jede Hierarchieebene der Produktstruktur umgesetzt werden, um eine optimale Demontagetiefe abzubilden. Die Synthese der statischen Produkt- und Lebenszyklusdaten mit optischen Merkmalen und Bewertungsinformationen kann prinzipiell unabhängig von der Entscheidung und Sequenzplanung implementiert werden und erfordert nur einen geringen Aufwand, sofern das Datenmanagement standardisiert ist. Ein Lernverhalten des RCP ist eine funktionelle Erweiterung der Entscheidungsfunktion und ebenfalls mit geringem Aufwand in einem Produktivsystem implementierbar, da dort genügend Daten vorliegen.

In den Funktionsaspekten der SPU birgt die Bauteilidentifikation das größte Potenzial. Hiermit kann festgestellt werden, welchen Fortschritt die Demontage bereits genommen hat oder ob ein Produkt durch mögliche Beschädigungen unvollständig geworden ist. Sie erlaubt damit auch die Bestimmung des initialen Zustandes, der Ausgangslage einer Demontageszene. Der Aufwand für die Identifikationsfähigkeit ist jedoch hoch, für den Fall, dass keine 3D-Produktdaten vorliegen, da in diesem Fall für jedes Objekt gelabelte Trainingsdaten erstellt werden müssen. Ist ein Objekt identifiziert, besteht die Möglichkeit über eine stereometrische Kamera die Raumposition zu bestimmen und so entweder in den Daten enthaltene Positionen zu validieren oder, falls keine Konstruktionsdaten vorliegen, die Positionen und Ausdehnungen der Komponenten im Arbeitsbereich festzustellen. Hierfür ist lediglich ein geeignetes Kamerasystem mit Software erforderlich. Durch die Implementierung geeigneter Algorithmen kann

damit ebenfalls eine optische Bewertung erfolgen. Eine Arbeitsraumüberwachung mit der SPU ist möglich, aber in Abhängigkeit der Zellenkonzeption nicht unbedingt notwendig, falls andere Sensorsysteme oder räumliche Trenneinrichtungen genutzt werden können. Eine Verknüpfung der SPU mit einer MRK-Anwendung eröffnet darüber hinaus auch die Möglichkeit des Erlernens von Operationen durch visuelle Analyse.

Für die DEU stellt das Werkzeugsystem die wichtigste Bedeutung für eine Integration in eine reale Demontageumgebung dar. Die Automatisierung einer flexiblen Demontage erfordert die Verfügbarkeit unterschiedlicher Werkzeuge (für verschiedene Verbindungsformen) und unterschiedlicher Handhabungssysteme, die entweder jeweils einer spezifischen Aktorik zugeordnet sind oder an einem System, z. B. einem Roboter, über ein Wechselsystem einsatzbezogen getauscht werden können. Ein flexibles Werkzeugsystem kann damit als die größte Herausforderung in der praktischen flexiblen Demontageautomatisierung betrachtet werden. Ein Robotersystem ist nicht zwingend erforderlich, für eine Demontage mit möglichst hohem Automatisierungsgrad, jedoch aufgrund der hohen Flexibilität ein wichtiger Baustein. Eine Voraussetzung der Integration in das Gesamtkonzept ist hierbei die Fähigkeit des Roboters, die OPC-Spezifikationen zu erfüllen und so eine Integration in das Datenmanagement-Framework zu ermöglichen. Dies erlaubt ebenfalls den Austausch von Prozessinformationen bezüglich Bewegungsdaten zwischen unterschiedlichen Anlagen für ähnliche Produkte. Soll die Demontage als MRK-Anwendung ausgeführt werden, da beispielsweise bestimmte Operationen nicht mit dem Robotersystem ausführbar sind, ist ein Interface notwendig, das die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine erlaubt. Da diese Interaktionsformen eine aufwendige Entwicklung bedingen, kann dieser Punkt als potenzielles Integrationsrisiko bewertet werden.

Die unternehmensindividuelle Bewertung der Integrationspotenziale eines Kreislaufwirtschaft-Modells muss dabei anhand einer übergeordneten Bewertungsstrategie festgelegt werden. *Alamerew et al.* [207] sprechen hier aufbauend auf der finanziellen Rentabilität von unterschiedlichen möglichen Bewertungskonzepten zur betrieblichen Festlegung der Umgangsstrategie mit Kreislaufwirtschafts-Prozessen. Beispielsweise kann die Festlegung produktbezogen erfolgen oder anhand der Struktur der Unternehmung festgelegt werden. Ein allgemeiner Vorteil für die Integrationspotenziale ist die Eigenschaft, dass die Agenten in beliebigen Konfigurationen auch unabhängig voneinander eingesetzt werden können, wenn die Input-Daten des jeweiligen Prozessschritts zur Verfügung stehen. Bei der Verwendung von Maschinen kann sowohl über einen Integrationsspezialisten mit proprietären Systemen gearbeitet werden als auch über Eigenkonstruktionen anwendungsspezifischer Anlagen. Bei der Computerhardware ist darauf zu achten, dass die benötigten Bibliotheken und Treiber auf den verwendeten Geräten lauffähig sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird dadurch die Auswahl im Bereich der KI-Hardware stark eingeschränkt. Bei der Software kann ebenfalls auf fertige Lösungen am Markt zugegriffen werden, um Entwicklungskosten im Unternehmen zu reduzieren. Da jedoch üblicherweise eine Anpassung erforderlich ist, entsteht auch hier Integrationsaufwand. Auch können durch Eigenentwicklungen auf Grundlage von *Open Source* Software die Implementierungskosten deutlich gesenkt werden, wenn das erforderliche Know-how im Unternehmen vorhanden ist. Bei Produkten mit mehreren hundert Komponenten pro Baugruppe ist die Demontage prinzipiell nach dem RCP-Konzept möglich, muss jedoch durch eine sinnvolle Trennung in Unterbaugruppen so aufgeteilt werden, dass der Berechnungsaufwand mit der verfügbaren Hardware annehmbare Prozesszeiten erreicht.

Integrationsbeispiel der Traktionsbatterie

Auf Grundlage der identifizierten Potenziale soll die Implementierung in eine reale Demontageumgebung am Fallstudienbeispiel der Batteriedemontage betrachtet werden. Für andere Demontagebereiche ist eine Konzeptintegration ebenso möglich, muss jedoch ähnlich dem Übertrag in angrenzende Industriebereiche auf modularer Ebene erfolgen und kann nicht immer für das Gesamtkonzept vorgeschlagen werden.

Der Bericht der *Circular Economy Initiative Deutschland* zum Thema *Ressourcenschonende Batteriekreisläufe* gibt einen umfassenden konzeptionellen Überblick zu möglichen Kreislaufwirtschaftsstrategien im Bereich der Traktionsbatterien [208]. In Abbildung 6.1 ist ein mögliches Kreislaufwirtschaftskonzept für Traktionsbatterien daraus dargestellt. Ein zentrales Element ist hierbei der zweite Punkt, die modellbasierte Entscheidungsplattform. Im Unterschied zum RCP ist diese Plattform aus einer Makroperspektive heraus aktiv und legt damit in einer stufenbezogenen Entscheidungslogik aus Entscheidungsbäumen und Fließschemasimulationen der unterschiedlichen Prozessketten das Optimum auf strategischer Ebene fest. Als Ergänzung dessen können in den Unternehmen RCP-Module integriert werden, um produktindividuelle Streuungen in der Entscheidung auszugleichen und auf diese Weise die Komplexität der erforderlichen Simulationsmodelle zu reduzieren. Für die genannten Entscheidungsplattformen können auch direkt auf Makroebene ebenfalls RCP-Module eingesetzt werden, da diese grundsätzlich auf allen Ebenen der Verwertungshierarchie Ergebnisse liefern können, sofern die Datenbasis vorhanden ist und somit auch Initialentscheidungen für komplette Produkte vor dem Schritt der Demontage möglich sind. Aus Sicht der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit ist es sinnvoll, die Entscheidung am Verarbeitungsort der EoL-Produkte bzw. auf Mikroebene zu treffen, da die Komplexität und die Anzahl der Faktoren für makrostrategische Modelle sehr schwierig abbildbar ist (z. B. globale Unterschiede in den rechtlichen Rahmenbedingungen) und nahezu gar nicht validierbar sein wird.

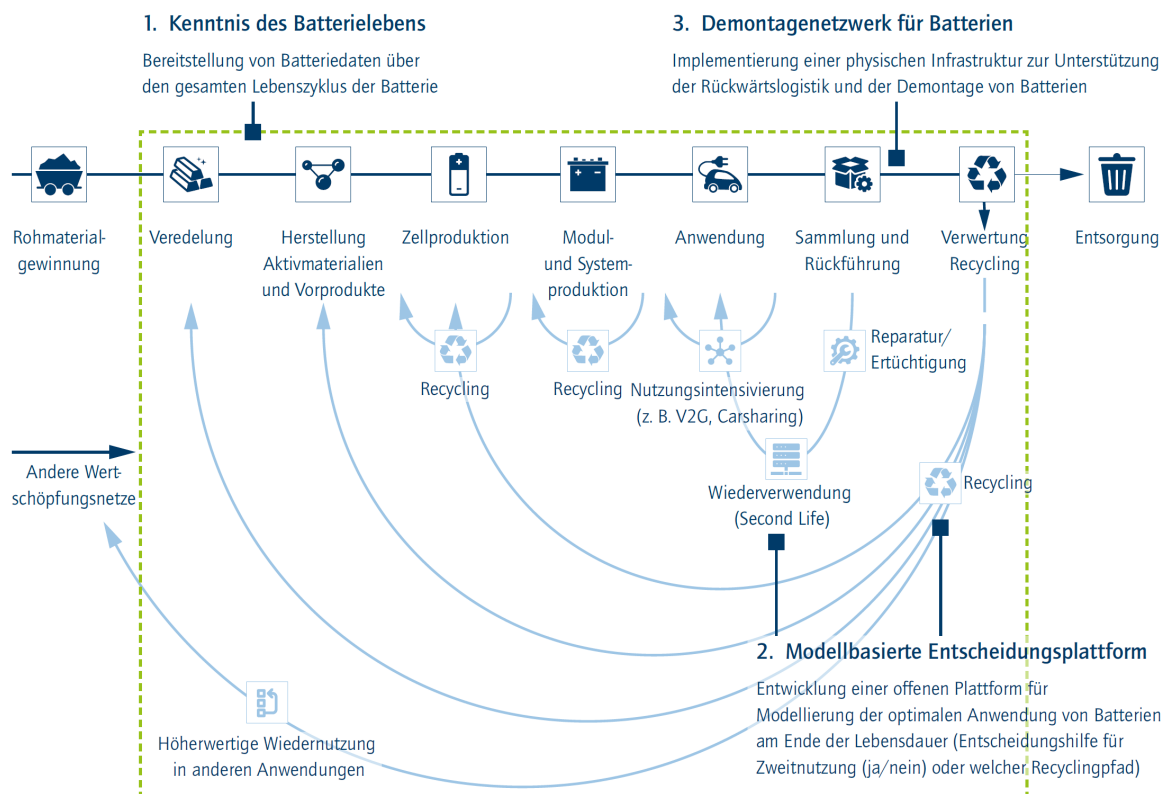


Abbildung 6.1: Circular-Economy Konzept für Traktionsbatterien aus [208]

Unabhängig von der tatsächlichen EoL-Entscheidung ist die Zerlegung auf Modulebene eine grundsätzliche Voraussetzung für Batterierecycling, die mit den umsetzungsorientierten Agenten der SPU und der DEU technisch automatisierbar sind. Falls die Module praktisch wiederverwendet werden sollen, darf die Batterie nicht tiefenentladen sein – das erfordert deutlich höhere Sicherheitsstandards und entspricht nicht dem hier gezeigten Prototyp. Es erfordert vielmehr eine umfassende Sicherheitsstrategie und Qualifizierung der Mitarbeitenden für MRK-Szenarien sowie eine speziell isolierte Konstruktion der Werkzeugsysteme. Da hier je nach Demontagegrad unterschiedliche Anforderungen bestehen, werden Konzepte für Demontageanlagen von Traktionsbatterien (z. B. *Weyrich et al.* [321]) grundsätzlich modular aufgebaut. Auch hier zeigen sich Integrationsperspektiven des hier entwickelten Konzeptes, in denen die Module vielfältig nutzbar gemacht werden können. Da die Anforderungen häufig Teilschritte beinhalten, die nicht automatisierbar sind, sollten bei der Batteriedemontage grundsätzlich hybride MRK-Konzepte eingesetzt werden, sofern die Hersteller keine demontagerechte, automatisierbare Konstruktionsweise befolgen.

Die Wirtschaftlichkeit von Kreislaufwirtschaftskonzepten bei Batterien ist grundsätzlich positiv zu bewerten, da es sich um Produkte mit einem hohen Wert handelt. Eine Studie von *Niese et al.* [322] zeigt, dass bis zum Jahr 2030 ein Marktvolumen von mehr als zehn Milliarden US-Dollar in der Verwertung von Altfahrzeugg Batterien liegt. Große Betriebe können hier EBIT-Margen von bis zu 15% im Recycling erzielen, wobei vor allem Niedriglohnländer für arbeitsintensive Schritte betrachtet wurden. Die detaillierte produktindividuelle Prozessautomatisierung in der Demontage lohnt sich hingegen nur bei *Second Life* oder anderer Weiterverwendung, da der höhere Werterhalt den Aufwand und die Investitionen der Anlagenstrukturen rechtfertigt. Hier sind jedoch die Margen deutlich niedriger. Für das Recycling müssen standardisierte und vollautomatisierte Strukturen geschaffen werden, um den in der Studie angesetzten Kostenwert von fünf Dollar pro Einheit realistisch umsetzen zu können. Größere Chancen liegen in der Refabrikation durch spezialisierte Aftermarket-Betriebe der Automobilindustrie, da hier bereits Absatz und Strukturen vorhanden sind. Außerdem kann der Wert der Produkte und damit die Entscheidungsgrundlage aufgrund der Erfahrung besser abgeschätzt werden.

Die Integration in angrenzende Industriebereiche kann ebenfalls funktions- und modulbezogen erfolgen. So müssen die Datenmanagementsysteme für einen erfolgreichen Einsatz innerhalb der Kreislaufwirtschaft auch in den Schritten des Produktionsprozesses und in der Entwicklungsphase berücksichtigt werden, um die Sammlung wichtiger Lebenszyklusdaten kontinuierlich zu erlauben. Für die Fertigungsbereiche stellen Bilderkennungssysteme ein hohes Potenzial dar, um mit großer Variantenvielfalt flexibel umgehen zu können. Gegenwärtig ist der Einsatz ähnlicher Systeme bereits in vielen Industriebereichen zu beobachten. Durch die Aufzeichnung und die Dokumentation der Fertigungsschritte in einem standardisierten Datenmodell kann die Idee der Demontage als *Reverse Assembly* umgesetzt werden, da es möglich ist, die Schritte in der Demontage durch ein OPC-UA verknüpftes Robotersystem zu nutzen. Allgemein bietet der Einsatz von KI-Technologien als Basistechnologie des 21. Jahrhunderts zahlreiche wertschöpfende Anwendungsbeispiele aus anderen Industriebereichen (vgl. [125]). Die im Konzept verwendeten Techniken der Bilderkennung und der Entscheidung durch Klassifizierung tabellarischer Daten können sowohl in der Fertigung, als auch in der Qualitätskontrolle oder der Logistik eingesetzt werden. Für den Fall, dass ein Unternehmen bereits KI-Modelle eines spezifischen Anbieters verwendet besteht eine hohe Chance, dass dem Konzept ähnliche Funktionen, auch mit anderen KI-Lösungen als den hier vorgestellten Modellen, implementiert werden können.

Die Remanufacturing-Branche ist für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft als Aufbereitungsträger ebenfalls ein wichtiger angrenzender Industriebereich. Hier sind analog zum Recycling Demontageprozesse erforderlich, weshalb das entwickelte Konzept hier ebenfalls einsetzbar ist. Entscheidungsmodelle

können hier in abgewandelter Form eingesetzt werden, da die Verwertungsentscheidung im Regelfall bereits getroffen wurde. Eine Adaption des RCP kann z. B. in Anlehnung an *Yang et al.* [323] innerhalb der Produktgestaltung verwendet werden, um optimale Demontagegrade für die Refabrikation bei gleichzeitiger wirtschaftlicher Optimierung aus Perspektive des OEM zu ermöglichen.

Für jedes Modul gibt es in der Praxis Arbeitsschritte, die Integrationshindernisse darstellen. Dies betrifft im Bereich der KI-Technologien vor allem die Verfügbarkeit geeigneter Trainingsdaten. Das Training der Bild-KI ist z. B. in der Praxis schwierig, vor allem, wenn keine CAD-Daten verfügbar sind. Auch ein Vorliegen des Produktmodells und der Informationen ist gegenwärtig nicht gewährleistet und verlangt ein übergreifendes Commitment der Stakeholder.

Allgemeine strategische Modelle zur Entscheidung über Verwertungsoptionen sind sehr komplex und in der Regel unvollständig. Systemdynamische Ansätze, beispielsweise für Traktionsbatterien [324], sind in der Lage fallbasierte Kausalketten für allgemeine Akteur-Gruppen (z. B. *die* Demonteure) abzubilden, dennoch wird es erforderlich sein, für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft souveräne Stakeholder in allen Teilnehmergruppen zu schaffen, weshalb gerade ein Entscheidungssystem analog dem hier entwickelten RCP einen Vorteil auf dem Weg zur umfassenden Kreislaufwirtschaft bieten kann.

Für den Recyclingbereich ist das Integrationspotenzial der entwickelten Module insgesamt als hoch zu bewerten, da der Stand der Technisierung in den meisten Betrieben heute überwiegend niedrig ist und eine Einführung von Automatisierungs- und Digitalisierungsmöglichkeiten die Anschlussfähigkeit an eine perspektivisch digitale Kreislaufwirtschaft ermöglicht. Bereits eine geringfügige Verbesserung eines Teilbereichs (Insellösung) kann die Kreislaufwirtschaft voranbringen. Ein großes Integrationsrisiko stellen allerdings die Mitarbeitenden in den Betrieben dar, die auf der einen Seite die technischen Qualifikationen zum Umgang mit den eingesetzten Lösungen benötigen und zum anderen den Wandlungsprozess hin zu einer veränderten Arbeitsrealität mittragen müssen. Dies trifft auch in besonderem Maße auf die Akzeptanz der Roboter durch die Mitarbeitenden und die Bedienung über das konzeptionierte HMI zu.

Zur weiteren Untersuchung der Integrationsmöglichkeiten ist es sinnvoll, das Konzept im Rahmen einer Pilotanlage innerhalb einer Batteriemodulfertigung einzusetzen, da so mehrere Perspektiven bezüglich der Kreislaufwirtschaft, dem Übertrag der Konzeptelemente in angrenzende Industriebereiche und der Funktionsweise sowie des Systemverhaltens in einer skalierten Umgebung unter Serienbedingungen untersucht werden können.

7 Weiterentwicklungspotenziale und aufbauende Fragestellungen

In diesem Kapitel werden mögliche Weiterentwicklungs- und Verbesserungsperspektiven auf Grundlage der Evaluationsergebnisse betrachtet. Nach einer Betrachtung aus Sicht des Gesamtsystems wird das Weiterentwicklungspotenzial der einzelnen Module dargelegt. Mögliche Verbesserungen durch allgemeine technische Innovationen werden ebenfalls vorgestellt. Abschließend sollen ethische Implikationen als aufbauende Fragestellungen angesprochen werden.

Aus Sicht des Gesamtsystems liegen die Weiterentwicklungspotenziale vor allem im Bereich der Kosteneffizienz des Konzeptes. Diese kann zum einen durch eine Reduzierung der Investitionen bzw. Verbesserung der Prozesszeiten gesteigert werden, zum anderen durch die Erhöhung der Handhabungsflexibilität in Bezug auf die mit dem Roboter ausführbaren Operationen. Ein zentrales Element hierfür ist ein Wechselsystem für unterschiedliche Greifer bzw. Trennwerkzeuge, welches zwar die Kosten des Systems erhöhen, aber dafür einen deutlich größeren Anteil der Tätigkeiten automatisierbar machen würde. Grundlage hierfür ist jedoch immer die Verfügbarkeit der benötigten Datenmodelle für die autonome Demontageplanung und die Erfassung und Detektion der Objektkomponenten durch die SPU. Als priorisiertes Ziel der Weiterentwicklung sollte daher zunächst untersucht werden, wie ein prototypisches Werkzeugsystem für unterschiedliche Operationen integriert werden kann und wie der Gesamtprozess auf zusätzliche Dimensionen in Bezug auf die Entscheidungsmöglichkeiten der DEU in der Ausführungsplanung reagiert. Ein anderer Ansatz ist die Untersuchung der Kostenoptimierung der Anlagenstruktur, da Planungsaufwand und Hardwareeinsatz gegenwärtig nur für sehr hochwertige Komponenten lohnenswert sind. Es kann beispielsweise untersucht werden, ob Sensorelemente kombiniert werden können oder preiswertere Robotermodelle ebenfalls eine Integration in das Informations-Ökosystem erlauben. Als anspruchsvollste Operation im Bereich der zerstörenden Demontage sind z. B. Schneidoperationen in Abhängigkeit der optischen Segmentierung von Bauteilkonturen und der Umgang des Systems mit solchen in einer kontinuierlichen Aktionsplanung von Interesse.

Ein weiterer Schritt für die Entwicklung des Gesamtkonzeptes ist die Skalierung des Demontagesystems auf mehrere Roboter oder eine Demontagearchitektur mit verschiedenen robotergestützten Demontagezellen, die direkt verkettet oder nach dem Prinzip einer Matrix-Fertigung (siehe [325]) aufgebaut sein können. Hierbei müssen auch Untersuchungen zur Planung auslastungs- und zielbasierter Steuerungsprinzipien des *Line-Balancing* in der Demontage berücksichtigt werden (vgl. [197, 326, 327]). Derartige Architekturen können sowohl für mehrstufige Demontageprozesse einer Produktgruppe als auch für eine flexible Vorgehensweise zur Demontage unterschiedlichster Produkte innerhalb einer Unternehmensumgebung genutzt werden. Um die Untersuchung solcher Weiterentwicklungskonzepte zu realisieren, können ebenfalls Simulationen der Demontage in Echtzeit zur Abstimmung und Optimierung allein auf Datenbasis erfolgen. Moderne Simulationsumgebungen wie das *Nvidia Isaac SDK* (siehe [328]) bieten die Möglichkeit Kamerasysteme in einer realistischen Umgebung zu simulieren, wobei die realen Lichtbrechungsverhältnisse in der Simulation berücksichtigt werden können. Auch besteht die Möglichkeit über VR-Systeme die menschlichen Prozessschritte in eine solche Simulationsumgebung zu integrieren und so ebenfalls einen ganzheitlichen MRK-Prozess abzubilden (vgl. [329]). In Bezug auf die Tauglichkeit des Systems im Kontext der Mitarbeitenden in Demontagebetrieben müssen auch für das hier vorgestellte Einzelkonzept weitere Untersuchungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit durchgeführt werden, die in diesem Forschungsprojekt nicht ausreichend validiert werden konnten.

Das Konzept erfordert die Einbindung in ein Informations-Ökosystem. Die Untersuchung eines solchen durch die prototypische Umsetzung in mehreren Unternehmen entlang der kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungskette muss daher Gegenstand weiterer Forschungsbestrebungen sein. Für das Systemkonzept spielt hierbei die tiefere Untersuchung und Bewertung der Nachhaltigkeitsziele im Entscheidungs- und Planungsprozess eine wichtige Rolle. Auch Entscheidungen höherer Ordnung von Seiten des Systems, beispielsweise für den autonomen An- und Verkauf von Informationen auf einer dezentralen Marktplatzstruktur, sind dabei ein wichtiger Untersuchungsgegenstand. Hierfür ist auch die Untersuchung der Informationswertbestimmung und der Handelsentscheidungen (vgl. [190]) erforderlich. Die gesamten Funktionsprinzipien eines derartigen informationsbasierten Ökosystems der Kreislaufwirtschaft können beispielsweise vorab in einem systemdynamischen Ansatz abgebildet werden.

Neben den genannten Weiterentwicklungszielen des Gesamtsystems können für die einzelnen Module ebenfalls konkrete Weiterentwicklungsideen formuliert werden:

Eine Weiterentwicklung des RCP ist für alle Teilfunktionen möglich. In Bezug auf das Wissensmanagement kann das verwendete Informationsmodell dahingehend erweitert werden, dass die verwendete Ontologie spezifisches Domänenwissen aus anderen Bereichen oder Prozessschritten im Lebenszyklus berücksichtigt, um so beispielsweise die Nutzung von validiertem Prozesswissen zielgerichtet in verteilte Systeme entlang der Kreislaufwirtschaft einfließen zu lassen. Das Konzept der *Knowledge Driven Robotics* [107] kann auf eine derartige Situation hin angepasst werden, sodass für bestimmte Wissenselemente direkte Handlungsoptionen, Regeln oder Parametrierungen aus der Beschaffenheit des Datensatzes abgeleitet werden können. In einer weiteren Entwicklung könnte ein solches System von einem kontextsensitiven formalen Prinzip hin zu einer regulären Grammatik und damit einer Typ-3-Sprache der Kreislaufwirtschafts-Domäne nach der *Chomsky-Schützenberger-Hierarchie* werden. Dies würde autonomes Handeln durch die syntaktischen Beziehungen direkt aus der Semantik des Wissensmanagements heraus ermöglichen (das Prozesswissen entspricht dabei den Produktionsregeln). Die Verbesserung des Entscheidungsprozessors kann zu einem gewissen Grad durch eine weitere Untersuchung mit realen praktischen Datensätzen erfolgen, da für dieses Projekt nur eine begrenzte Anzahl an Referenzdaten zur Verfügung standen. Aktuell entscheidet der RCP primär anhand der Wirtschaftlichkeit der Verwertungsoption, dies kann jedoch daran liegen, dass die Referenzdaten diesbezüglich bereits eine Tendenz der Voreingenommenheit in den manuellen Entscheidungen zeigen. Hier kann z. B. eine Simulation der gesamten Informationskette der Kreislaufwirtschaft mit einem größeren Datensatz genutzt werden, um das Verhalten in einem vollständig verketteten Ökosystem mit allen realen Stakeholdern abzubilden. Unüberwachtes Lernen und Clustering in einem solchen Umfeld können die natürlich vorkommende Anzahl der Klassen in den Daten bestimmen. Nach Analyse dieser Klassen ist es dann möglich, weitere Verwertungsstrategien zu entwickeln, da es offensichtlich in der Praxis mehr als die drei hier verwendeten Optionen gibt. Weiterhin können die Kategorisierung der Verwertungsoptionen und das Ergebnis in Bezug auf die Demontage quantifiziert werden, um bei der Sequenzplanung eine Verbesserung der Abwägung bei Hierarchieebenen-übergreifenden Pfaden zu verbessern. In Folge dessen kann beispielsweise nach Methoden von *Guo et al.* [209] optimiert werden. Für die Planung der Demontageoperationen ist es sinnvoll, wenn im Rahmen eines *Design for Disassembly* bereits in der Konstruktionsphase die Verwertung der Produkte berücksichtigt wird. Dies kann sowohl durch eine koordinierte Auswahl der Verbindungselemente für die automatisierte Demontage als auch durch die Verwendung von Werkstoffen, die wertorientiert recyclingfähig sind, umgesetzt werden. Es ist ebenfalls möglich, als Weiterentwicklung bereits die Demontagesequenz in der Konstruktionsfolge des Produktes festzulegen [330]. Hierbei können Optimierungsfunktionen eingesetzt werden, die die Position von Verbindern so festlegen, dass die Demontage nur in der optimierten Sequenz durch Vorrangrelationen möglich wird.

Die SPU kann durch den Einsatz weiterer Kamerasysteme für unterschiedliche Perspektiven verbessert werden. Gerade bei Produkten, die keine überwiegend orthogonalen Verbindungselemente aufweisen, kann es erforderlich sein, dass eine weitere Perspektive zur Erfassung der Raumkoordinaten der Bauteile vorhanden ist. Die Qualität der Bauteildetektion lässt sich durch die Verwendung neuerer Netzarchitekturen steigern. Neue Modelle wie *EfficientDet* [331] bieten im Vergleich zur hier verwendeten *ResNet V2* Struktur fast die doppelte mAP im Referenzdatensatz bei besserer Framerate. Allgemein sind bei der Weiterentwicklung der SPU die kurzen Innovationszyklen im Bereich der Bilderkennung zu beachten und es sollten immer die aktuellsten Architekturen verwendet werden. Die Erweiterung der Wahrnehmungsfähigkeiten kann zum Erlernen bestimmter Arbeitsfolgen verwendet werden (vgl. [79]). Auch das Training mit Hilfe von CAD-Daten sollte in zukünftigen Weiterentwicklungen untersucht werden. Im Bereich der Erkennung von Schrauben und anderen Verbindungselementen mit charakteristischen geometrischen Formen kann die Kombination von klassischen Methoden und DNN analog [320] zu besseren Ergebnissen im Detektionsprozess führen. Für die Diagnose von Bauteilzuständen können weitere Techniken eingebunden werden. Auch die direkte Messung von Bauteilen kann hierbei betrachtet werden. So ist beispielsweise die optische Bewertung von Batterien durch Detektion von Ausdehnungen der Zellen denkbar.

Um die DEU spezifisch zu verbessern, kann die Untersuchung vollautomatisierter Aktionssequenzen für unterschiedliche Verbinder oder anspruchsvolle Komponentengruppen (z. B. biegeschlaiffe Kabelbäume) angestrebt werden. Auch ist die Demontage beschädigter Bauteile in der Praxis bislang nicht umsetzbar, da die Effektoren der Werkzeuge häufig definierte geometrische Bedingungen erfordern. Die Nutzung adaptiver Werkzeugsysteme zur Diagnose von System- und Komponentenzuständen ist ein weiteres Entwicklungspotenzial. Hierdurch würde die Trennung des Systemagenten zwischen SPU und DEU verschwimmen, da die Akteure des Systems so gleichzeitig sensorische Eigenschaften bekommen. Eine Möglichkeit ist hier z. B. die Diagnose des Zustandes von Schraubverbindungen über Drehmomentkurven oder die Bestimmung der Qualität von Klebeverbindungen über die erforderlichen Trennkräfte. Derartige Informationen bieten ein Wertpotenzial für den OEM, da solche Informationen auch zur Produktoptimierung im Entwicklungsprozess eingesetzt werden können.

Die Weiterentwicklung des Konzeptes in zukünftigen Arbeiten kann neben der Verbesserung der bestehenden Technologien auch den Einsatz neuer Innovationen beinhalten. Im Bereich der Einbindung der menschlichen Arbeitskräfte können beispielsweise *Mixed-Reality* Anwendungen eingesetzt werden, etwa um die Demontageumgebung und die Informationsebene so zu verknüpfen, dass die virtuell vorhandenen Erkenntnisse bestmöglich an die Mitarbeitenden weitergegeben werden können. Eine weitere Perspektive für eine verbesserte Interaktion zwischen Robotersystem und Mensch stellen hochentwickelte *Conversational-AI* Systeme, z. B. *Nvidia Jarvis*, dar [332]. Hierbei handelt es sich um Dialogsysteme, die in der Lage sind flexibel auf die Eingaben und Fragen der Bedienenden einzugehen, wobei in Erweiterung bestehender Möglichkeiten wie der Sprachsteuerung die Konversationspfade nicht zwingend vorgegeben sein müssen. Sofern die Demontageanlagen mehrere Zellsysteme umfassen, kann es sinnvoll sein, anstelle der möglichst verteilten *Edge-Computing* Vorgehensweise auf zentrale Datenintegrationspunkte im Unternehmen und lokale Server zu setzen. Um diese Architekturen umsetzen zu können, ist beispielsweise für die Vision-Systeme eine *Infiniband-HDR* Netzwerkverbindung mit bis zu 200 GBit/s möglich (vgl. [333]), die ebenfalls die Verknüpfung mit aufwendigen Simulationen in Echtzeit und mit einer 1:1 Datenrepräsentation umsetzen kann. Bestehen solche Schnittstellen, ist das Konzept der *Cloud Robotic Disassembly* in greifbarer Nähe [334]. Hierbei werden *Cloud Manufacturing Services* mit der roboterbasierten Demontageanwendung kombiniert, um Planungs- und Interaktionsschritte in den Cloudbereich zu verlagern und so auch größere Anlagenverbünde optimal zu steuern. Die Konzepte des Cloud Manufacturing werden im Industriebereich bereits implementiert, z. B. in der

Volkswagen Industrial Cloud [335], um Ökosysteme zu schaffen, in denen alle prozessbeteiligten Stakeholder Möglichkeiten für Zugriff und Ablage spezifischer Datensätze erhalten. Neben den eher evolutionären Technologiekonzepten sind auch disruptive Ansätze im Bereich der robotergestützten Demontage denkbar. So können biologisch inspirierte Schwarmmodelle in der heuristischen Sequenzplanung verwendet werden (z. B. [336, 337]) oder es ist langfristig möglich, DNS als Speichermedium über die Molekülstruktur zu verwenden, womit eine bis zu 10^6 mal bessere Leistungsdichte und damit die lokale Verfügbarkeit gigantischer Datenmengen möglich wäre. Im Bereich der wirtschaftlichen Weiterentwicklung des Konzeptes ist es denkbar, dass das Angebot der Demontage als *As-a-Service*-Lösung im Rahmen von geschlossenen Wertschöpfungsketten integriert wird und die Kapazität der adaptiven Demontagesysteme über zentrale Plattformen so gesteuert wird, dass die erreichbare Auslastung einen wirtschaftlichen Betrieb und damit den gewinnbringenden Einsatz in der Kreislaufwirtschaft begünstigt. Industrielle Interoperabilitätsframeworks, wie das hier verwendete OPC UA oder auch ROS, standardisieren die herstellerunabhängige Programmierung, die einen Austausch der Prozessdaten ermöglichen und somit auch für eine kurzfristige Reorganisation von Fertigungssystemen zu Demontagekapazitäten verwendet werden können. Es sind damit zahlreiche innovative Weiterentwicklungspotenziale denkbar. Eine offene Analyse des gegenwärtigen Standes möglicher Technologieinnovationen aus dem Fertigungs- und Recyclingbereich sei daher für jedes Anwendungsprojekt dringend empfohlen.

Ethische Implikationen und Technikfolgen der automatisierten Demontage müssen ebenfalls betrachtet werden, um ein ganzheitliches Bild der Wirkung der Entwicklung auf Umwelt und Gesellschaft zu gewinnen. Vor allem vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsdimensionen sind weitere Untersuchungen die Faktoren *Umwelt* und *Soziales* betreffend durchzuführen.

Die Antizipation der möglichen Folgen eines Technologieeinsatzes kann zum Zeitpunkt der Entwicklung nicht sicher vorhergesagt werden. Auch muss bei der Prognostizierung möglicher Auswirkungen eine wissenschaftlich-rationale Neutralität gewahrt werden, um zu vermeiden, dass bestimmte Stakeholder-Gruppen einer Technologieentwicklung in der Folgenabschätzung übervorteilt oder übergangen werden. Das Spannungsfeld zwischen der interessenbezogenen Neutralität und der Bewertung der Auswirkungen soll jedoch in keinem Fall die ethisch fundierte Reflexion der Technologien verhindern [338]. Vielmehr soll das Bewusstsein der Fehlbarkeit auch für eine Technikfolgenabschätzung präsent sein. Die Frühwarnung vor Risiken und die Früherkennung von Chancen sind also wichtig, um einen verantwortungsvollen Umgang mit Technologien zu erlangen (vgl. [339]).

Die Technologieentwicklung verändert die Mittel, nicht den Einsatzzweck. So ist für das hier entstandene Konzept eine Verbesserung der Situation im Bereich der Demontage innerhalb der Kreislaufwirtschaft erzielt worden, ohne dass die Zielsetzung einer Kreislaufwirtschaft als solche untersucht worden ist. Untersuchungen und Argumente bezüglich der Bedeutung und Notwendigkeit nachhaltiger Wirtschaftskonzepte finden sich jedoch an zahlreichen Stellen (siehe auch [340]). Die Folgen der Automatisierung von Demontageprozessen führen zum einen zu einer ökonomischen Verbesserung des Gesamtprozesses, die wiederum durch die Steigerung der Attraktivität auch die Anwendungshäufigkeit und damit die ökologische Perspektive in der Kreislaufwirtschaft verbessern kann. In Bezug auf die soziale Dimension vermeidet die Automatisierung die direkte Exposition der Mitarbeitenden gegenüber schädlichen Einflüssen in der Demontageumgebung und körperlich belastender Tätigkeiten. Auf der anderen Seite sind Diskussionen über den steigenden Automatisierungsgrad, vor allem in Produktionsbereichen, geprägt von der Vorstellung, die Arbeitsgrundlage der Beschäftigten anzugreifen. Hiergegen werden jedoch von vielen Experten Auffassungen vertreten, dass der Einsatz von Robotern zunächst unergonomische und wirtschaftlich kritische Arbeitsbereiche verändert und insgesamt eher zu einer Verschiebung

hin zu qualifizierteren Tätigkeiten als zu einer Abnahme von Arbeitsplätzen führt (vgl. [341]). Die wirtschaftlichen Perspektiven von Robotik und datenbasierten Plattformökonomien sind hingegen unstrittig. Die *Wissenschaftlichen Dienste* des Deutschen Bundestags dokumentieren hier beispielsweise die Potenziale aus einer lieferkettenübergreifenden Standardisierung und sehen ein hohes wirtschaftliches Potenzial, vor allem im Dienstleistungssektor [342].

Eine differenzierte Betrachtung ist ebenfalls beim Themenkomplex der künstlichen Intelligenz über eine breite Menge unterschiedlicher Quellen zu finden (vgl. Literaturauswahl in [343]). Hierbei stehen ebenfalls die wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Potenziale im Vordergrund. Die kognitive Robotik als Schnittgebiet der Robotik und KI bedarf daher der Einordnung in diese Bewertungen. In Bezug auf die Steuerung des Anlagenkonzeptes muss auch bei nichtmonotonen Operationsfolgen und einer kontinuierlichen Bewertung des Umfeldes und der Handlungsoptionen sichergestellt werden, dass das System keinem Menschen Schaden zufügt. Gegenwärtig wird dies durch extern realisierte Überwachungseinrichtungen oder Sicherheitsprogramme, die übergeordnet ablaufen, realisiert. Ein zukünftiges Potenzial kann hier beispielsweise die algorithmische Integration einer Schutzfunktion in die Sensorik der Wahrnehmungseinheit als Integration in die Aktionsplanung, gegebenenfalls mit einer Echtzeit-Neuplanung im Fall von Hindernissen, sein. Bei optischen Schutzalgorithmen ist darauf zu achten, dass die Trainingsdaten der KI die Erkennung von Mitarbeitenden auf einer ausreichend diversen Basis erlernen, um z. B. unabhängig von Geschlecht oder Hautfarbe stets eine gleich hohe Verlässlichkeit zu bieten (vgl. [344]). Im Bericht der *Enquete-Kommission Künstliche Intelligenz* [345] wird dieser Umgang mit Bias sowie der Umgang mit anderen Risiken, Rechtsfragen, ethischen Perspektiven, Sicherheit, Nachhaltigkeit, Gesellschaft und Staat, Bildung und Forschung, Wirtschaft sowie einigen Fallstudien ausführlich betrachtet. Das Wohlergehen von Mensch und Umwelt soll demnach im Fokus der Bestrebungen im Themenfeld der KI liegen, wobei Chancen und Risiken in begründeten Fallentscheidungen gegeneinander abgewogen werden müssen. Zentrale Handlungsempfehlung ist auch hier die Gestaltung guter und gerechter Rahmenbedingungen für das Leben zukünftiger Generationen, was in einer menschenzentrierten Ausgestaltung auch zu mehr Technologieakzeptanz führen soll. Der zentrale Begriff der *Sustainable AI* für die nachhaltigen Einsatzpotenziale wird eingeführt. Unter diesem Credo ist eine Weiterentwicklung automatisierter Demontagesysteme als einem wichtigen Baustein einer Kreislaufwirtschaft wünschenswert.

Eine vollumfängliche Untersuchung aller (ethischen) Implikationen für zukünftige Auswirkungen übersteigt den Rahmen dieser Forschungsarbeit, weshalb nur die beschriebenen Ansätze zur Sensibilisierung genannt werden. Die allgemeinen Fragestellungen, auch für die dem Forschungsgegenstand zu Grunde liegenden Technologien, allen voran der künstlichen Intelligenz, müssen letztlich durch weitere Forschungsarbeiten in der Tiefe untersucht und durch die Politik im Rahmen der Richtungsentscheide der zukünftigen nationalen und internationalen KI-Strategien beantwortet werden.

8 Zusammenfassung und Schlussfazit

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde ein Konzept entwickelt und validiert, um den Prozess der Demontage innerhalb der Kreislaufwirtschaft durch eine Informationsintegration der Produkt- und Lebenszyklusdaten zu automatisieren und damit zu verbessern. Es wurde dabei ausgehend von einer Analyse der Stakeholder (Demontagebetriebe) ein Prozessentwurf gestaltet, der die Anforderungen und Randbedingungen der Demontage erfüllt. Um die dafür erforderlichen Funktionen in einem System abzubilden, wurde eine agentenbasierte Architektur mit modularem Aufbau entworfen. Die jeweiligen Systemmodule beschreiben dabei ein intelligentes Planungs- und Steuerungssystem (RCP), ein sensorisches System (SPU) und eine mechanische Ausführungseinheit (DEU). Der RCP ist als wichtigstes Modul in der Lage die dezentral verfügbaren Datensätze mit produktindividuellen Zustandsdaten zu kombinieren und auf Grundlage dessen eine Verwertungsentscheidung pro Komponente zu treffen. Auf diese Weise kann der Demontagegrad eines Produktes individuell bestimmt werden und es ist möglich eine nachhaltige Verwertungsstrategie auf Komponentenebene zu implementieren. Weiterhin plant der RCP die Demontagesequenz zur Weitergabe an die Ausführungseinheit. Da die Entscheidungen für die Sequenzplanung bereits durch die Verwertungsentscheidung getroffen werden, ist eine effiziente Planung auf Grundlage der Vorrangrelationen aus der Demontagematrix heraus möglich. Das Entscheidungsverhalten des RCP kann sich durch ein Lernelement an veränderte Rahmenbedingungen anpassen und stetig verbessern. Die SPU ist für die (optische) Wahrnehmung innerhalb der Demontageszene verantwortlich. Durch ein Kamerasystem werden Komponenten und Verbinder identifiziert und es ist möglich deren Raumposition zu detektieren. Auf diese Weise werden Informationen zum Ausführungsstatus und zum Umgang mit Produkten ohne Zeichnungsdaten gewonnen. Die SPU kann darüber hinaus auch Fehler an den Komponenten detektieren und so zu einer direkten Bewertung der individuellen Komponenten beitragen. Eine wichtige Funktion im Kontext der MRK ist auch die Arbeitsraumüberwachung. Hier kann durch ein Tracking der in der Szene befindlichen Personen das Robotersystem durch die Definition von Sicherheitsabständen eine effektive Kollaboration sicherstellen. Die DEU umfasst den Roboter, das Werkzeugsystem und das HMI zur Befehlseingabe. Nachdem die Sequenz vom RCP bestimmt wurde, gelangt der Ausführungsbefehl zur DEU, wo in Abhängigkeit der Komponenten das Werkzeugsystem konfiguriert und mit dem Roboter die Demontage umgesetzt wird. Das HMI informiert die Mitarbeitenden dabei über den Demontagefortschritt, erlaubt Korrekturen und dient als Werkerführung bei manuellen Operationen.

Als Basis dieser Funktionsprinzipien ist ein Datenmodell entwickelt worden, welches alle relevanten Informationen für die gesamte Produktstruktur zielgerichtet verfügbar macht. Um die Interoperabilität zwischen verteilten Systemen sicherzustellen, wurde mit OPC UA ein Framework festgelegt, das als standardisiertes Industrie-4.0-Kommunikationswerkzeug eine Integration des Konzeptes in unterschiedlichen Bereichen der Stakeholder in der Kreislaufwirtschaft erlaubt. Das Kommunikationskonzept der Anlagenstruktur wird so auf allen Ebenen des Referenzarchitekturmodells von der Produkt- über die Feld- und Prozessebene bis hin zu der unternehmensübergreifenden *Connected World* beschrieben.

Das Gesamtkonzept wurde in einem Prototyp zur selektiven MRK-Demontage von Batteriemodulen aus einer Elektro-Traktionsbatterie umgesetzt. Hierbei wurden die Module RCP, SPU und DEU auf aktueller Hardware implementiert und der Prozessablauf anhand von Operationsschritten zur Demontage von Schraubverbindungen innerhalb der Batteriestruktur validiert.

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte Konzept eine Antwort auf die Forschungsfrage nach einer Verbesserung des Recyclingprozesses durch Prozessautomatisierung auf Grundlage der Schließung der Informationslücken in der Verwertungskette gibt. Das standardisierte, durchgängige Informationsmanagement ist der wichtigste Punkt um verfahrens- und typenunabhängig eine große Variantenvielfalt unterschiedlicher Produkte zu demontieren. Die Systembestandteile müssen dabei alle mit dem zentralen Kommunikationskonzept verbunden sein, um die richtige *Orchestrierung* der Modulfunktionen für eine effektive Demontage zu koordinieren. Hierbei werden Daten bidirektional zwischen dem Demontagesystem und einer externen Datenbasis übertragen. Individuelle Verwertungswege können so durch ein Entscheidungssystem auf Anlagenebene in Abhängigkeit der individuellen Informationen zu Produkt und Prozess festgelegt werden. Die Entscheidung berücksichtigt dabei grundsätzlich alle Dimensionen der Nachhaltigkeit, sofern diese im Datensatz vorhanden sind. Die Gewichtung der Zieldimensionen ist dabei nicht festgelegt und kann sich dynamisch verändern, wobei die Versuche gezeigt haben, dass wirtschaftliche Faktoren die stärkste Auswirkung auf das Ergebnis haben. Ein verlässliches Bilderkennungssystem, vor allem für kleine Objekte, ist in der Demontage von großer Bedeutung, um eine flexible Planung innerhalb des Aktionsraumes durchzuführen. Moderne KI-Systeme bieten hier ein hohes Zuverlässigkeitsniveau in Bezug auf die Identifikation und Bestimmung der Raumposition. Unter Berücksichtigung von Übertragungs- und Verarbeitungszeiten konnte so im Rahmen einer MRK-Operation das Demontageergebnis gegenüber der bisherigen manuellen Demontage in Bezug auf Effizienz und Effektivität verbessert werden. Die Sicherheitseinrichtungen konnten im Labormaßstab überprüft werden und die Gebrauchstauglichkeit der Bedienoberfläche wurde für den Prototyp bestätigt. Für industrielle Anwendungen ist eine individuelle Abnahme erforderlich. Der MRK-Ansatz ist wichtig, da in der kognitiven Robotik mit logischen Ablaufplanungen nicht alle möglichen Weltzustände hinreichend berücksichtigt werden können.

Das kontextsensitive, kognitive Demontagesystem kann damit als Option für eine konkrete Ausgestaltung der Kreislaufwirtschaft in unterschiedlichen Produktbereichen verwendet werden. Die Vergleichbarkeit der Evaluation mit vollautomatisierten oder unflexiblen Ansätzen muss fallbezogen erfolgen, da die Modelle jeweils unterschiedliche Annahmen berücksichtigen und die Validierungsobjekte sowie die technischen Möglichkeiten zum jeweiligen Zeitpunkt voneinander abweichen. Allgemein ist es möglich, die einzelnen Modulfunktionalitäten individuell in praktische Anwendungen zu überführen, was die Einsatzschwelle in niedrig technisierten Bereichen herabsetzt und damit ein hohes Potenzial für die (Teil-)Implementierung bietet. Eine Anpassung des Konzeptes und der Parameter der verwendeten Modelle ist für individuelle Produktsituationen erforderlich. In Industriebereichen mit hohen Restwerten innerhalb der EoL-Produkte ist der Einsatz einer autonomen Entscheidungsplattform und einer teilautomatisierten Ausführungseinheit hilfreich, um eine individuelle Optimierung des Verwertungsprozesses zu erzielen. Gerade im Feld des Batterierecyclings entsteht so ein wichtiger Baustein, kreislaufwirtschaftliche Prozesse auch in Hochlohnstandorten ökonomisch sinnvoll abbilden zu können.

Die Serienentwicklung des Konzeptes birgt weiteres Entwicklungspotenzial hinsichtlich der in industriellen Prozessen geforderten Kennwerte bezüglich der Verlässlichkeit in der Systemperformance. So ist eine Verbesserung der Entscheidungsverlässlichkeit für die tatsächliche Verwertungsoption über die Demontageentscheidung hinaus ein Ergebnis, das nur mit einer größeren Menge realer Trainingsdaten erreichbar ist. Das Problem der Datenverfügbarkeit in der Konzeptentwicklung trifft dabei alle Teilaspekte mit KI-Einsatz, z. B. auch das Bildverarbeitungssystem. Im Rahmen industrieller Einsatzszenarien muss der erhöhte Aufwand in diesen Bereichen berücksichtigt werden. Es ist daher sinnvoll, diese Aspekte der technologischen Prozessfähigkeit und der volumenbezogenen Skalierbarkeit in zukünftigen Forschungsvorhaben näher zu betrachten.

Für zerstörende Trennverfahren ist im Bereich der DEU noch weitere Arbeit in Bezug auf Modularisierungsmöglichkeiten zu leisten. Die Untersuchung flexibler Werkzeugsysteme in Verbindung mit komplexen mehrdimensionalen Trennoperationen stellt ebenfalls eine Herausforderung dar, die im Rahmen dieser Arbeit nicht umfassend betrachtet werden konnte. Auch diese Erkenntnisse können darüber hinaus in die Entscheidungsfindung einfließen, um die Prozesskostenvarianz in Abhängigkeit des Demontageverfahrens zu berücksichtigen.

In der Praxis ist die Anpassung der Gewichtungen im Entscheidungsprozessor möglich, aber immer nur auf Grundlage des beschränkten Wissens des einzelnen Akteurs. Hier ist es sinnvoll, mit mehreren Stakeholdern Datensätze zu erheben und diese in einer Trainingsmatrix zusammenzuführen, mit der dann alle Stakeholder das geteilte Wissen erlernen können. Die Rückübertragung der validierten Prozessinformationen stellt bereits einen wichtigen Baustein für diese Funktionen dar. Perspektivisch ist die Informationsdurchdringung in bestimmten Produktbereichen zukünftig weit genug, um eine übergreifende EoL-Wertschöpfungskette zu gestalten, die den Einsatz des Konzeptes in der Kreislaufwirtschaft erlaubt. Die entwickelte Methodik steht und fällt dabei mit dem Informationsangebot und der consequenten Nachverfolgbarkeit von Lifecycle-Daten über alle Stationen des Produktlebens.

Bei dem hier entwickelten Konzept eines kognitiven Robotiksystems zur flexiblen Automatisierung von adaptiven Demontageprozessen können somit durch eine modulare Funktionsstrategie alle menschlichen Fähigkeitsbereiche der Wahrnehmung, Gewandtheit und Intelligenz, die für die Produktdemontage erforderlich sind, berücksichtigt werden. Dies erlaubt theoretisch eine autonome Planung und Durchführung von Demontageprozessen innerhalb der Systemgrenzen. In der Praxis treten jedoch immer wieder Situationen auf, die im Vorfeld nicht berücksichtigt werden können. Durch die Erfassung der Umgebung ist das System in seinen Grenzen flexibel, die Intuition und Kreativität erfahrener Mitarbeitender lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch nicht maschinell implementieren. Um also das Potenzial der verfügbaren Technologien mit einer hohen Erfolgswahrscheinlichkeit zu realisieren, ist es erforderlich die Anwendungen bei einer hohen prozessseitigen Unsicherheit als MRK-Anwendung auszuliegen.

Dadurch, dass Entscheidung und Sequenzplanung im RCP entkoppelt ist und validierte Daten in Bezug auf die Demontagekosten dokumentiert werden, ist es möglich mit einem praktikablen Berechnungsaufwand eine vollständige, bauteilindividuelle Demontageplanung zu realisieren, die sowohl strategische Nachhaltigkeitsansprüche als auch operative Wirtschaftlichkeitsaspekte erfüllt. So kann der *Satisfice*-Gedanke bei der Entscheidung auf Basis des erlernten Verhaltens mit einer echten Optimierung der operativen Vorgehensweise kombiniert werden. Dies ist ein positiver Effekt für die Implementierbarkeit und Nachvollziehbarkeit in der Praxis.

Die Verknüpfung von Robotik und Recycling ist ein wichtiges Zukunftsthema, für das dieses Konzept einen grundlegenden Beitrag leistet. Durch Verbesserung der Attraktivität der Kreislaufwirtschaftsprozesse unter nachhaltigen Zielaspekten mit dem Einsatz der Erkenntnisse aus dieser Forschungsarbeit kann die Erreichung der SDGs der Vereinten Nationen durch die perspektivische Einführung einer rentablen Kreislaufwirtschaft vorangebracht werden.

9 Literatur

- [1] *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: A/RES/70/1*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
- [2] H. Wilts und H. Berg, „Digitale Kreislaufwirtschaft: Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe: in brief 04/2017“, Wuppertal Institut, Wuppertal, Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit, Apr. 2017.
- [3] D. Spath, Hg., *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0: [Studie]*. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2013.
- [4] Microsoft Inc., Hg., „Manufacturing Trends Report“, Seattle, WA, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/EN-US-CNTNT-Report-2019-Manufacturing-Trends.pdf>. Zugriff am: 15. April 2019.
- [5] S. Yang, M. R. Aravind, J. Kaminski und H. Pepin, „Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing“, *Applied Sciences (MDPI)*, Nr. 8, 2018, Art. no. 1177, doi: 10.3390/app8071177.
- [6] H. Martens und D. Goldmann, *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5>
- [7] S. G. Winter, „Satisficing“ in *The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management*, M. Augier und D. J. Teece, Hg., London: Palgrave Macmillan UK, 2018, S. 1509–1513, doi: 10.1057/978-1-137-00772-8_594.
- [8] *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG): KrWG*, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/index.html>
- [9] D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans, „Entsorgung und Kreislaufwirtschaft“ in *VDI-Buch, Handbuch Logistik*, D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans, Hg., 3 Aufl. Berlin: Springer, 2008, S. 487–523, doi: 10.1007/978-3-540-72929-7_11.
- [10] P. Ghisellini, C. Cialani und S. Ulgiati, „A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 114, S. 11–32, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
- [11] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions“, *SSRN Journal*, 2017, doi: 10.2139/ssrn.3037579.
- [12] G. Seliger, „Montage und Demontage“ in *Taschenbuch für den Maschinenbau*, H. Dubbel, K.-H. Grote und J. Feldhusen, Hg., 23 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, S97-S103, doi: 10.1007/978-3-642-17306-6_212.
- [13] S. E. Marshalla und T. W. Archibald, „Substitution in a Hybrid Remanufacturing System“, *Procedia CIRP*, Jg. 26, S. 583–588, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.073.
- [14] A. Radaschin, A. Voda, E. Minca und A. Filipescu, „Task Planning Algorithm in Hybrid Assembly/Disassembly Process“, *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 45, Nr. 6, S. 267–272, 2012.
- [15] B. Lotter und H.-P. Wiendahl, *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [16] *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik*, 60050-351, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Sep. 2014.

- [17] B. Heinrich, P. Linke und M. Glöckler, *Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [18] R. Müller, J. Franke, B. Kohlenkötter, A. Raatz und A. Verl, Hg., *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*, 1. Aufl. München: Hanser, 2019.
- [19] W. Bauer, M. Bender, M. Braun, P. Rally und O. Scholtz, „Leichtbauroboter in der manuellen Montage - einfach einfach anfangen: Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen“, Fraunhofer Gesellschaft, Stuttgart. [Online]. Verfügbar unter: http://publica.fraunhofer.de/e-prints/urn_nbn_de_0011-n-4151100.pdf. Zugriff am: 19. März 2020.
- [20] *Recyclingorientierte Produktgestaltung*, VDI 2243, VDI, Berlin, 2002.
- [21] J. Feldhusen und B. Gebhardt, *Product Lifecycle Management für die Praxis: Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [22] S. Kubler, W. Derigent, K. Främling, A. Thomas und É. Rondeau, „Enhanced Product Lifecycle Information Management using “communicating materials”“, *Computer-Aided Design*, Jg. 59, S. 192–200, 2015, doi: 10.1016/j.cad.2013.08.009.
- [23] R. Klostermeier, S. Haag und A. Benlian, *Geschäftsmodelle digitaler Zwillinge: HMD Best Paper Award 2018*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, 2020.
- [24] R. Ackoff, „From data to wisdom“, *Journal of Applied Systems Analysis*, Jg. 16, Nr. 1, S. 3–9, 1989.
- [25] C. Zins, „Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge“, *J. Am. Soc. Inf. Sci.*, Jg. 58, Nr. 4, S. 479–493, 2007, doi: 10.1002/asi.20508.
- [26] J. Rowley, „The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy“, *Journal of Information Science*, Jg. 33, Nr. 2, S. 163–180, 2007, doi: 10.1177/0165551506070706.
- [27] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Hg., *Handbuch Industrie 4.0: Bd. 4: Allgemeine Grundlagen*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53254-6>
- [28] M. Weyrich *et al.*, „Industrie 4.0 am Beispiel einer Verbundanlage“, *atp edition*, Jg. 56, 07-08, S. 52, 2014, doi: 10.17560/atp.v56i07-08.301.
- [29] V. Fennemann, C. Hohaus und J.-P. Kopka, „Circular Economy Logistics: Für eine Kreislaufwirtschaft 4.0“, Fraunhofer IML, 2018.
- [30] D. Goldmann, „Recycling 4.0 – Auf dem Weg zur Digitalisierung der Kreislaufwirtschaft“ in *Recycling und Rohstoffe – Band 12*, S. Thiel, D. Goldmann, O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky und B. Friedrich, Hg., Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2019, S. 3–14.
- [31] C. Knieke, S. Lawrenz, M. Fröhling, D. Goldmann und A. Rausch, „Predictive and Flexible Circular Economy Approaches for Highly Integrated Products and their Materials as Given in E-Mobility and ICT“, *MSF*, Jg. 959, S. 22–31, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.959.22.
- [32] S. Blömeke *et al.*, „Recycling 4.0: An Integrated Approach Towards an Advanced Circular Economy“ in *ICT4S2020: 7th International Conference on ICT for Sustainability*, Bristol United Kingdom, 06212020, S. 66–76, doi: 10.1145/3401335.3401666.
- [33] A. J. D. Lambert, „Optimal disassembly of complex products“, *Int. J. Prod. Res.*, Jg. 35, Nr. 9, S. 2509–2523, 1997.
- [34] G. Seliger, B. Basdere, T. Keil und U. Rebafka, „Innovative Processes and Tools for Disassembly“, *CIRP Annals*, Jg. 51, Nr. 1, S. 37–40, 2002, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61460-7.
- [35] H. Poschmann, H. Brüggemann und D. Goldmann, „Robotergetriebene Demontage als Treiber der Digitalisierung im Recycling der Zukunft“ in *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 13, *Recycling und*

- Sekundärrohstoffe, Band 13*, E. Thomé-Kozmiensky, O. Holm, B. Friedrich und D. Goldmann, Hg., Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2020, S. 570–587.
- [36] K. Feldmann, S. Trautner und O. Meedt, „Innovative disassembly strategies based on flexible partial destructive tools“, *Annual Reviews in Control*, Jg. 23, S. 159–164, 1999, doi: 10.1016/S1367-5788(99)90079-2.
- [37] A. Priyono, W. L. Ijomah und U. S. Bititci, „Strategic operations framework for disassembly in remanufacturing“, *Journal of Remanufacturing*, Jg. 5, Nr. 11, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1186/s13243-015-0018-3>
- [38] L. Kintscher, S. Lawrenz, H. Poschmann und P. Sharma, „Recycling 4.0 - Digitalization as a key for the advanced circular economy“, *Journal of Communications*, Jg. 15, Nr. 9, S. 652–660, 2020, doi: 10.12720/jcm.15.9.652-660.
- [39] A. J. D. Lambert und S. M. Gupta, *Disassembly modeling for assembly, maintenance, reuse, and recycling*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=106136>
- [40] G. B. Dantzig, *Linear Programming and Extensions*. s.l.: Princeton University Press, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1290571>
- [41] J.-G. Kang und D. Brissaud, „A Product Lifecycle Costing System with Imprecise End-of-Life Data“ in *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses: Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan, June 11th-13th, 2007*, S. Takata und Y. Umeda, Hg., London: Springer-Verlag London Ltd, 2007, S. 467–472, doi: 10.1007/978-1-84628-935-4_81.
- [42] S. K. Das, P. Yedlarajiah und R. Narendra, „An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost“, *International Journal of Production Research*, Jg. 38, Nr. 3, S. 657–673, 2000, doi: 10.1080/002075400189356.
- [43] P. Vanegas *et al.*, „Ease of disassembly of products to support circular economy strategies“ (eng), *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 135, S. 323–334, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.022.
- [44] F. Afrinaldi, M. Zamari, M. Saman und A. M. Shaharoun, „THE EVALUATION METHODS OF DISASSEMBLABILITY FOR AUTOMOTIVE COMPONENTS - A REVIEW AND AGENDA FOR FUTURE RESEARCH“, *Jurnal Mekanikal*, Nr. 26, S. 49–62, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://jurnalmekanikal.utm.my/index.php/jurnalmekanikal/article/view/138>
- [45] R. Sodhi, M. Sonnenberg und S. Das, „Evaluating the unfastening effort in design for disassembly and serviceability“, *Journal of Engineering Design*, Jg. 15, Nr. 1, S. 69–90, 2004, doi: 10.1080/0954482031000150152.
- [46] C. B. Boks, E. Kroll, W. Brouwers und A. Stevels, „Disassembly modeling: two applications to a Philips 21" television set“ in *1996 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE-1996*, Dallas, TX, USA, 1996, S. 224–229, doi: 10.1109/ISEE.1996.501882.
- [47] A. Desai und A. Mital, „Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production“, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Jg. 32, Nr. 4, S. 265–281, 2003, doi: 10.1016/S0169-8141(03)00067-2.
- [48] E. Kroll und B. S. Carver, „Disassembly analysis through time estimation and other metrics“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 15, Nr. 3, S. 191–200, 1999, doi: 10.1016/S0736-5845(99)00026-5.
- [49] R. Bokranz und K. Landau, *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2012.

- [50] S. Vongbunyong und W. H. Chen, *Disassembly Automation*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [51] S. Tumkor und G. Senol, „Disassembly Precedence Graph Generation“ in *2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, 2007, S. 70–75, doi: 10.1109/ISAM.2007.4288451.
- [52] E. Westkämper und M. Decker, *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [53] J. Gao, D. Xiang, H. Chen, G. Duan und J. Wang, „Disassembly AND/OR graph model for "disassembly for recycling"“ in *Conference Record. 2003 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Boston, MA, USA, Jan. 2003, S. 54–59, doi: 10.1109/ISEE.2003.1208047.
- [54] F. Cerdas *et al.*, „Defining Circulation Factories – A Pathway towards Factories of the Future“, *Procedia CIRP*, Jg. 29, S. 627–632, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.032.
- [55] T. (I. Zeller, S. (I. Birkenfeld, O. (I. Keich, B. Nawothnig und J. H. Seelig, „Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung: Abschlussbericht“, Clausthal-Zellerfeld, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-426447.html>. Zugriff am: 13. Juli 2018.
- [56] G. O'Regan, „Robotics“ in *INNOVATION IN COMPUTING COMPANION: A compendium of select, pivotal inventions*, G. O'REGAN, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, S. 221–226, doi: 10.1007/978-3-030-02619-6_47.
- [57] E. Uhlmann und J. Krüger, „Industrieroboter“ in *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*, K.-H. Grote, B. Bender, D. Göhlich und H. Dubbel, Hg., Berlin: Springer Vieweg, 2018, S. 1655–1663, doi: 10.1007/978-3-662-54805-9_126.
- [58] *Montage- und Handhabungstechnik: Kenngrößen für Industrieroboter*, VDI 2861, VDI, Berlin, 1988.
- [59] International Federation of Robotics, Hg., „Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://ifr.org/downloads/press2018/Executive%20Summary%20WR%202019%20Industrial%20Robots.pdf>. Zugriff am: 7. April 2020.
- [60] International Federation of Robotics, Hg., „Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf. Zugriff am: 22. April 2021.
- [61] S. Thesmann, *Interface design: Usability, user experience und accessibility im Web gestalten*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [62] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Hg., *Handbuch Industrie 4.0: Bd. 1: Produktion*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45279-0>
- [63] W. M. Holt, „Moore's law: A path going forward“ in *2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, San Francisco, CA, USA, Jan. 2016, S. 8–13, doi: 10.1109/ISSCC.2016.7417888.
- [64] M. Weck und C. Brecher, *Werkzeugmaschinen 4: Automatisierung von Maschinen und Anlagen*, 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [65] V. Plenk, *Grundlagen der Automatisierungstechnik kompakt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [66] P. Kopacek, „Semiautomatized disassembly - some examples“, *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 38, Nr. 1, S. 146–151, 2005.
- [67] R. Knoth, M. Brandstotter, B. Kopacek und P. Kopacek, „Automated disassembly of electr(on)ic equipment“ in *Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the*

- Environment*, San Francisco, CA, USA, Mai 2002, S. 290–294, doi: 10.1109/ISEE.2002.1003282.
- [68] B. Heinrich, P. Linke und M. Glöckler, *Grundlagen Automatisierung: Erfassen - Steuern - Regeln*, 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
 - [69] S. Hesse, „Automatische Montagemaschinen“ in *VDI-Buch, Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis ; mit 16 Tabellen*, B. Lotter und H.-P. Wiendahl, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, S. 219–308, doi: 10.1007/3-540-36669-5_8.
 - [70] J. R. Duflou, G. Seliger, S. Kara, Y. Umeda, A. Ometto und B. Willems, „Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study“, *CIRP Annals*, Jg. 57, Nr. 2, S. 583–600, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.009.
 - [71] J. Östlin, E. Sundin und M. P. Björkman, „Product Life-cycle Implications for Remanufacturing Strategies“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 17, Nr. 11, S. 999–1009, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.021>
 - [72] L. Jackson, „Environmental Responsibility Report: Geschäftsbericht Umwelt und Nachhaltigkeit Apple Inc., Geschäftsjahr 2017“, Apple Inc., Cupertino, CA (USA), 2018.
 - [73] H. Poschmann, H. Brüggemann und D. Goldmann, „Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 92, Nr. 4, 2020, doi: 10.1002/cite.201900107.
 - [74] T. Shibata und K. Tanie, „Ecologically conscious automated disassembly system“, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 1980–1985, 1994, Art. no. 5010431. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/IROS.1994.407592>
 - [75] S. Vongbunyong, M. Pagnucco und S. Kara, „Vision-Based Execution Monitoring of State Transition in Disassembly Automation“, *Int. J. Automation Technol.*, Jg. 10, Nr. 5, S. 708–716, 2016, doi: 10.20965/ijat.2016.p0708.
 - [76] S. Vongbunyong, „Applications of Cognitive Robotics in Disassembly of Products“. Dissertation, Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2013.
 - [77] S. Vongbunyong, S. Kara und M. Pagnucco, „A Framework for Using Cognitive Robotics in Disassembly Automation“ in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 173–178.
 - [78] S. Vongbunyong, S. Kara und M. Pagnucco, „General plans for removing main components in cognitive robotic disassembly automation“ in *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA 2015)*, Queenstown, New Zealand, 2015, S. 501–506, doi: 10.1109/ICARA.2015.7081199.
 - [79] S. Vongbunyong, P. Vongseela und J. Sreerattana-aporn, „A Process Demonstration Platform for Product Disassembly Skills Transfer“, *Procedia CIRP*, Jg. 61, S. 281–286, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.197.
 - [80] J. Jungbluth, W. Gerke und P. Plapper, „An Intelligent Agent-Controlled and Robot-Based Disassembly Assistant“ (en), *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Jg. 235, Nr. 1, S. 12005, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/235/1/012005.
 - [81] J. Jungbluth, „Entwicklung eines intelligenten, robotergestützten Assistenzsystems für die Demontage industrieller Produkte“. Dissertation, University of Luxembourg, Luxembourg, 2019.
 - [82] J. Jungbluth, W. Gerke und P. Plapper, „Agentenbasierte Steuerung der Mensch-Roboter-Interaktion“, *atp edition*, Jg. 58, Nr. 12, S. 58, 2016, doi: 10.17560/atp.v58i12.593.

- [83] J. Jungbluth, W. Gerke und P. Plapper, *Robotix-Academy Conference for Industrial Robotics (RACIR) 2018: Recent Progress Toward Intelligent Robot Assistants for Non-Destructive Disassembly*, 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker, 2018.
- [84] J. Jungbluth, R. Krieger, W. Gerke und P. Plapper, *Robotix-Academy Conference for Industrial Robotics (RACIR) 2018: Combining Virtual and Robot Assistants: A Case Study about Integrating Amazon's Alexa as a Voice Interface in Robotics*, 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker, 2018.
- [85] J. Jungbluth, P. Plapper und W. Gerke, „Demontage von Elektroantrieben mit Assistenzrobotern zum wirtschaftlichen Recycling“, Tagungsband AALE 2016, 2016.
- [86] J. Jungbluth, P. Plapper und W. Gerke, „Towards Intelligent Robot Assistants for the non-destructive Disassembly of End of Life Products“ in *Robotix Academy Conference for Industrial Robotics*, W. Gerke, Hg., 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://or-bilu.uni.lu/bitstream/10993/35204/1/RAC_JanJungbluth.pdf
- [87] F. Torres, S. Puente und C. Díaz, „Automatic cooperative disassembly robotic system: Task planner to distribute tasks among robots“, *Control Engineering Practice*, Jg. 17, Nr. 1, S. 112–121, 2009, doi: 10.1016/j.conengprac.2008.05.013.
- [88] J. A. Corrales, G. J. F. Garcia, F. A. Candelas, J. Pomares und F. Torres, „Safe Cooperation between Human Operators and Visually Controlled Industrial Manipulators“ in *Human Robot Interaction*, D. Chugo, Hg., Japan, 2010, S. 203–225.
- [89] F. Torres, S. T. Puente und R. Aracil, „Disassembly Planning Based on Precedence Relations among Assemblies“, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 21, S. 317–327, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s001700300037>
- [90] F. Torres, S. T. Puente und C. Díaz, „Introducing an Automatic Cooperative Disassembly Robotic System“, *Information Control Problems in Manufacturing Conference*, 2006.
- [91] F. Torres, P. Gil, S. T. Puente, J. Pomares und R. Aracil, „Automatic PC disassembly for component recovery“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 23, 1-2, S. 39–46, 2004, doi: 10.1007/s00170-003-1590-5.
- [92] J. Pomares, F. Torres und S. T. Puente, „Disassembly movements for geometrical objects through heuristic methods“, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Nr. 4569, S. 71–80, 2002, doi: 10.1117/12.455266.
- [93] J. Pomares, S. T. P. Méndez, F. T. Medina, F. A. C. Herías und P. Gil, „Virtual disassembly of products based on geometric models“, *Computers in Industry*, Nr. 55, S. 1–14, 2004. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2004.03.001>
- [94] J. Pomares, S. T. Puente, G. J. Garcia und F. Torres, „Multi-Sensorial System for the Generation of Disassembly Trajectories“ in *2006 World Automation Congress*, Budapest, Hungary, 2006, S. 1–6, doi: 10.1109/WAC.2006.376004.
- [95] P. Gil, F. Torres, F. H. Ortiz und O. Reinoso, „Detection of partial occlusions of assembled components to simplify the disassembly tasks“, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 30, S. 530–539, 2006. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0055-4>
- [96] P. Gil, S. T. Puente, F. A. Torres, J. Pomares und F. A. Candelas, „DATA FUSION FROM MULTIPLE CAMERAS FOR AUTOMATIC DISASSEMBLY“, *IFAC Proceedings Volumes*, ISBN 0-08-043908-X, 2001.
- [97] P. Gil, J. Pomares, Diaz, S. vT. Puente C., F. A. C. Herías und F. T. Medina, „Flexible multi-sensorial system for automatic disassembly using cooperative robots“, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Nr. 20, S. 757–772, 2007. [Online]. Verfügbar unter: 10.1080/09511920601143169
- [98] C. Díaz, S. T. Puente und F. Torres, „Task planner for human-robot interaction inside a cooperative disassembly robotic system“, *Proc. ICINCO*, Nr. 2, S. 19–24, 2007.

- [99] H.-J. Kim, R. Harms und G. Seliger, „Automatic Control Sequence Generation for a Hybrid Disassembly System“, *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, Nr. 4, S. 194–206, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4147554>
- [100] E. Uhlmann, T. Friedrich, G. Seliger und R. Harms, „Realization of an adaptive modular control for a disassembly system“, *The 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing*, 2005, Art. no. 8672347. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1511446>
- [101] S. Kernbaum, C. Franke und G. Seliger, „Flat screen monitor disassembly and testing for remanufacturing“, *International Journal of Sustainable Manufacturing (IJSJM)*, Jg. 1, Nr. 3, S. 435–441, 2009, doi: 10.1504/IJSJM.2009.023979.
- [102] B. Kopacek und P. Kopacek, „Semi-automatisierte Demontage für Elektronikschrottrecycling“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Jg. 120, Nr. 5, S. 149–153, 2003, doi: 10.1007/BF03053933.
- [103] B. Kopacek, „Intelligent disassembly of components from printed circuit boards to enable re-use and more efficient recovery of critical metals“, *Proc. IZM: Electronics Goes Green 2016+*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7829842>
- [104] P. Kopacek und B. Kopacek, „Intelligent, flexible disassembly“, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 30, 5-6, S. 554–560, 2006, doi: 10.1007/s00170-005-0042-9.
- [105] G. Koppensteiner, R. Hametner, R. Paris, A. M. Passani und M. Merdan, „Knowledge driven mobile robots applied in the disassembly domain“, *Proceedings of the 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, S. 52–57, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6144855>
- [106] M. Merdan, W. Lepuschitz, T. Meurer und M. Vincze, „Towards ontology-based automated disassembly systems“, *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, INSPEC 11726469. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5675479>
- [107] G. Koppensteiner, C. Krofitsch, R. Hametner, D. P. Miller und M. Merdan, „Application of Knowledge Driven Mobile Robots for Disassembly Tasks“ in *Studies in Computational Intelligence*, v.480, *Recent Advances in Robotics and Automation*, G. Sen Gupta, Hg., Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 311–321. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37387-9_24
- [108] C. Rujanavech, J. Lessard, S. Chandler, S. Shannon, J. Dahmus und R. Guzzo, „Liam - An Innovation Story“, Apple Inc., Cupertino, CA (USA), 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.apple.com/ru/environment/pdf/Liam_white_paper_Sept2016.pdf. Zugriff am: 17. Juli 2018.
- [109] K. Purdy, „Apple’s Daisy Robot Is Still a Stunt, But Their Other Recycling Ideas Are Good“, *iFixit*, 19. Apr. 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.ifixit.com/News/15794/apple-daisy-cobalt-recycling>. Zugriff am: 18. April 2020.
- [110] W. H. Chen, K. Wegener und F. Dietrich, „A robot assistant for unscrewing in hybrid human-robot disassembly“, *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, S. 536–542, 2014, doi: 10.1109/ROBIO.2014.7090386.
- [111] K. Wegener, *Mensch-Roboter-Kooperation zur Demontage von Traktionsbatterien*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015. Essen: Vulkan-Verl., 2015.
- [112] K. Wegener, W. H. Chen, F. Dietrich, K. Dröder und S. Kara, „Robot Assisted Disassembly for the Recycling of Electric Vehicle Batteries“, *Procedia CIRP*, Jg. 29, S. 716–721, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.051.

- [113] C. Friedrich, A. Lechler und A. W. Verl, „The control architecture RoViDiAsS — A robotic visual disassembly and assembly system“, *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2016, Art. no. 16035627. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7474735>
- [114] J. Li, M. J. Barwood und S. Rahimifard, „An automated approach for disassembly and recycling of Electric Vehicle components“, *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 2014, Art. no. 14982843. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7056158>
- [115] J. Li, M. Barwood und S. Rahimifard, „Robotic disassembly for increased recovery of strategically important materials from electrical vehicles“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 50, S. 203–212, 2018, doi: 10.1016/j.rcim.2017.09.013.
- [116] J. Li, M. Barwood und S. Rahimifard, „A multi-criteria assessment of robotic disassembly to support recycling and recovery“, *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 140, S. 158–165, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.09.019.
- [117] A. M. Turing, „Computing Machinery and Intelligence“, *Mind*, Jg. 59, Nr. 236, S. 433–460, 1950. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.jstor.org/stable/2251299>
- [118] W. Adami, C. Lang, S. Pfeiffer und F. Rehberg, Hg., *Montage braucht Erfahrung: Erfahrungsbasierte Wissensarbeit in der Montage*, 1. Aufl. München: Rainer Hampp Verlag, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/10419/68588>
- [119] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Hg., *Handbuch Industrie 4.0: Bd. 2 : Automatisierung*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53248-5>
- [120] H. Ritter, G. Sagerer und R. Dillmann, *Human Centered Robot Systems: Cognition, Interaction, Technology*, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=511236>
- [121] H. Levesque und G. Lakemeyer, „Chapter 23 Cognitive Robotics“ in *Foundations of Artificial Intelligence, Handbook of knowledge representation*, F. van Harmelen, V. Lifschitz und B. Porter, Hg., 1 Aufl., Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008, S. 869–886, doi: 10.1016/S1574-6526(07)03023-4.
- [122] F. van Harmelen, V. Lifschitz und B. Porter, Hg., *Handbook of knowledge representation*, 1. Aufl. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008.
- [123] F. Chollet, *Deep learning with Python*. Shelter Island, NY: Manning Publications Co, 2018.
- [124] A. V. Joshi, *Machine Learning and Artificial Intelligence*. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [125] P. Buxmann und H. Schmidt, *Künstliche Intelligenz: Mit Algorithmen zum wirtschaftlichen Erfolg*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2019.
- [126] D. H. Wolpert und W. G. Macready, „No free lunch theorems for optimization“, *IEEE Trans. Evol. Computat.*, Jg. 1, Nr. 1, S. 67–82, 1997, doi: 10.1109/4235.585893.
- [127] F. Rosenblatt, „The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain“ (eng), *Psychological review*, Jg. 65, Nr. 6, S. 386–408, 1958, doi: 10.1037/h0042519.
- [128] K. Hornik, M. Stinchcombe und H. White, „Multilayer feedforward networks are universal approximators“, *Neural Networks*, Jg. 2, Nr. 5, S. 359–366, 1989, doi: 10.1016/0893-6080(89)90020-8.
- [129] R. Bellman, *Dynamic programming*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Pr, 1957. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gwern.net/docs/statistics/decision/1957-bellman-dynamicprogramming.pdf>

- [130] W. Hesse, „Ontologie und Weltbezug – vom philosophischen Weltverständnis zum Konstrukt der Informatik“ (De;de), *Informatik Spektrum*, Jg. 37, Nr. 4, S. 298–307, 2014, doi: 10.1007/s00287-014-0795-3.
- [131] E. D. Falkenberg *et al.*, *A framework of information system concepts: The FRISCO report (Web edition)*. Leiden: University of Leiden, Department of Computer Science, 1998.
- [132] G. Schreiber, „Knowledge Engineering“ in *Foundations of Artificial Intelligence, Handbook of knowledge representation*, F. van Harmelen, V. Lifschitz und B. Porter, Hg., 1 Aufl., Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008, S. 929–946.
- [133] J. I. Olszewska *et al.*, „Ontology for Autonomous Robotics“ in *2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Lisbon, 2017, S. 189–194, doi: 10.1109/ROMAN.2017.8172300.
- [134] U. P. Schultz, J. S. Laursen, L.-P. Ellekilde und H. B. Axelsen, „Towards a Domain-Specific Language for Reversible Assembly Sequences“, *RC 2015, LNCS 9138*, S. 111–126, 2015.
[Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20860-2_7
- [135] M. Weyrich und Y. Wang, „Architecture design of a vision-based intelligent system for automated disassembly of E-waste with a case study of traction batteries“, *IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2013, Art. no. 13877745. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6648043>
- [136] F. Lin, „Situation Calculus“ in *Foundations of Artificial Intelligence, Handbook of knowledge representation*, F. van Harmelen, V. Lifschitz und B. Porter, Hg., 1 Aufl., Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008, S. 649–670.
- [137] W. Rautenberg, *Einführung in die Mathematische Logik: Ein Lehrbuch*, 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [138] C. S. Tzafestas und S. G. Tzafestas, „Intelligent Robotic Assembly and Disassembly: General Architecture and Implementation Case Studies“ in *Advanced Manufacturing, Advances in Manufacturing: Decision, Control and Information Technology*, S. G. Tzafestas, Hg., London: Springer, 1999, S. 267–280. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0855-9_25
- [139] S. J. Russell, P. Norvig, E. Davis und D. Edwards, *Artificial intelligence: A modern approach*. Boston, Columbus, Indianapolis, New York, San Francisco, Upper Saddle River, Amsterdam, Cape Town, Dubai, London, Madrid, Milan, Munich, Paris, Montreal, Toronto, Delhi, Mexico City, Sao Paulo, Sydney, Hong Kong, Seoul, Singapore, Taipei, Tokyo: Pearson, 2016.
- [140] W. van der Hoeck und M. Wooldridge, „Multi-Agent Systems“ in *Foundations of Artificial Intelligence, Handbook of knowledge representation*, F. van Harmelen, V. Lifschitz und B. Porter, Hg., 1 Aufl., Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008, S. 887–928.
- [141] C. Beierle und G. Kern-Isberner, Hg., *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*, 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [142] M. Thielscher, *Reasoning Robots: The Art and Science of Programming Robotic Agents*. Dordrecht: Springer, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10140548>
- [143] P. Göhner, *Agentensysteme in der Automatisierungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [144] W. Shen, Q. Hao, H. J. Yoon und D. H. Norrie, „Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review“, *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 20, Nr. 4, S. 415–431, 2006, doi: 10.1016/j.aei.2006.05.004.
- [145] H. Hippenmeyer und T. Moosmann, *Automatische Identifikation für Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

- [146] J. Beyerer, F. Puente León und C. Frese, *Automatische Sichtprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [147] B. Neumann, „Bildverstehen und KI – der kleine Grenzverkehr“, *Künstl Intell*, Jg. 25, Nr. 4, S. 307–308, 2011, doi: 10.1007/s13218-011-0144-5.
- [148] J. Schmidhuber, „Deep learning in neural networks: An overview“ (eng), *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, Jg. 61, S. 85–117, 2015, doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
- [149] I. Strelnikov und O. Cherepanov, *Small objects detection problem*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mc.ai/small-objects-detection-problem/> (Zugriff am: 26. Mai 2020).
- [150] J. Pang, C. Li, J. Shi, Z. Xu und H. Feng, „R²-CNN: Fast Tiny Object Detection in Large-Scale Remote Sensing Images“, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Jg. 57, Nr. 8, S. 5512–5524, 2019, doi: 10.1109/TGRS.2019.2899955.
- [151] N. M. DiFilippo und M. K. Jouaneh, „A System Combining Force and Vision Sensing for Automated Screw Removal on Laptops“, *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, Jg. 15, Nr. 2, S. 887–895, 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2679720.
- [152] D. S. Leidner, *Cognitive Reasoning for Compliant Robot Manipulation*. Switzerland: Springer Nature, 2019.
- [153] S. Murray, W. Floyd-Jones, Y. Qi, G. Konidaris und D. J. Sorin, „The microarchitecture of a real-time robot motion planning accelerator“ in *2016 49th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO)*, Taipei, Taiwan, 2016, S. 1–12, doi: 10.1109/MICRO.2016.7783748.
- [154] Y. Wang und M. Weyrich, „Towards a novel learning assistant for networked automation systems“ in *Technologien für die intelligente Automation*, Band 1, *Machine learning for cyber physical systems: Selected papers from the international Conference ML4CPS 2015*, O. Niggemann und J. Beyerer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016, S. 51–57, doi: 10.1007/978-3-662-48838-6_7.
- [155] Y. Wang, D. Herrling, P. Stroganov und A. Rausch, „Ontology-based Automatic Adaptation of Component Interfaces in Dynamic Adaptive Systems“ in *ADAPTIVE 2016: The Eighth International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications : March 20-24, 2016, Rome, Italy*, J. Lloret Mauri und M. Freire, Hg., Wilmington, DE, USA: IARIA, 2016, S. 51–59.
- [156] H. Laux, R. M. Gillenkirch und H. Y. Schenk-Mathes, *Entscheidungstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [157] Deutscher Bundestag, „Abschlussbericht der Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung": Konzept Nachhaltigkeit“, Berlin, 26. Juni 1998.
- [158] M. Colledani und O. Battaia, „A decision support system to manage the quality of End-of-Life products in disassembly systems“, *CIRP Annals*, Nr. 65, S. 41–44, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.121>
- [159] L. Duta, F. G. Filip, J.-M. Henrioud und C. Popescu, „Disassembly Line Scheduling with Genetic Algorithms“, *Int. J. of Computers, Communications & Control*, Jg. 3, Nr. 3, S. 270–280, 2008.
- [160] L. Cong, F. Zhao und J. W. Sutherland, „Integration of dismantling operations into a value recovery plan for circular economy“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 149, S. 378–386, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.115.
- [161] Y. Feng, Y. Gao, G. Tian, Z. Li, H. Hu und H. Zheng, „Flexible Process Planning and End-of-Life Decision-Making for Product Recovery Optimization Based on Hybrid Disassembly“, *IEEE*

- Trans. Automat. Sci. Eng.*, Jg. 16, Nr. 1, S. 311–326, 2019, INSPEC 18360196, doi: 10.1109/TASE.2018.2840348.
- [162] E. García, M. A. L. Jiménez, P. G. d. Santos und M. A. Armada, „The evolution of robotics research“, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, S. 90–104, 2007, 1070-9932/07. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4141037>
- [163] L. M. Galantucci, G. Percoco und R. Spina, „Assembly and Disassembly Planning by using Fuzzy Logic & Genetic Algorithms“, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Jg. 1, Nr. 2, S. 67–74, 2004. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/cs/0412054.pdf>
- [164] A. ElSayed, E. Kongar und S. M. Gupta, „A GENETIC ALGORITHM APPROACH TO END-OF-LIFE DISASSEMBLY SEQUENCING FOR ROBOTIC DISASSEMBLY“, *Proceedings of the 2010 Northeast Decision Sciences Institute Conference*, S. 402–408, 2010.
- [165] Y. Tian, T. Y. Wang, B. H. Ding, G. Y. He und H. J. Zheng, „Research on modularization fuzzy petri net of disassembly system“ in *EM*, Beijing, China, 2009, S. 822–826, doi: 10.1109/ICI-EEM.2009.5344474.
- [166] E. Kongar und S. M. Gupta, „Disassembly sequencing using genetic algorithm“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 30, 5-6, S. 497–506, 2006, doi: 10.1007/s00170-005-0041-x.
- [167] H. Wang, D. Xiang und G. Duan, „A genetic algorithm for product disassembly sequence planning“, *Neurocomputing*, Nr. 71, S. 2720–2726, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.11.042>
- [168] A. Bandera, J. Dias, M. Vincze und L. J. Manso, „Special issue on cognitive robotics“ (eng), *Cognitive processing*, Jg. 19, Nr. 2, S. 231–232, 2018, doi: 10.1007/s10339-018-0863-8.
- [169] T. Ebinger, S. Kaden, S. L. Thomas, R. Andre, N. M. Amato und U. Thomas, „A General and Flexible Search Framework for Disassembly Planning“, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, S. 3548–3556, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8460483>
- [170] J. Wang, J. H. Liu, S. H. Q. Li und Y. F. Zhong, „Intelligent selective disassembly using the ant colony algorithm“, *AI EDAM*, Jg. 17, Nr. 04, S. 325–333, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1017/S0890060403174045>
- [171] G. Tian, M. Zhou und P. Li, „Disassembly Sequence Planning Considering Fuzzy Component Quality and Varying Operational Cost“, *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, Jg. 15, Nr. 2, S. 748–760, 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2690802.
- [172] S. Chen, J. Yi, H. Jiang und X. Zhu, „Ontology and CBR based automated decision-making method for the disassembly of mechanical products“, *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 30, S. 564–584, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.06.005>
- [173] A. Elmi und S. Topaloglu, „Multi-degree cyclic flow shop robotic cell scheduling problem: Ant colony optimization“, *undefined*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.03.007>
- [174] H. Samani, Hg., *Cognitive robotics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://proquest.tech.safaribooksonline.de/9781482244571>
- [175] A. Cesta, A. Orlandini und A. Umbrico, „Fostering Robust Human-Robot Collaboration through AI Task Planning“, *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 1045–1050, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.022.
- [176] O. Okorie, K. Salonitis, F. Charnley, M. Moreno, C. Turner und A. Tiwari, „Digitisation and the Circular Economy: A Review of Current Research and Future Trends“, *Energies*, Jg. 11, Nr. 11, S. 3009, 2018, doi: 10.3390/en11113009.

- [177] S. Kornmesser und W. Büttemeyer, *Wissenschaftstheorie: Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg: J.B. Metzler Verlag, 2020.
- [178] M. Wille, *Gottlob Frege: Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2018.
- [179] J.-P. Thommen, „Definition: Deduktion“, *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 14. Feb. 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/deduktion-28280>. Zugriff am: 26. Juni 2020.
- [180] J.-P. Thommen, „Definition: Induktion“, *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 14. Feb. 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/induktion-38677>. Zugriff am: 26. Juni 2020.
- [181] M. Schlick, „Über das Fundament der Erkenntnis“, *Erkenntnis*, Jg. 4, Nr. 1, S. 79–99, 1934, doi: 10.1007/BF01793485.
- [182] H. Keuth, „Karl Poppers „Logik der Forschung““ in *Handbuch Karl Popper*, G. Franco, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 45–63, doi: 10.1007/978-3-658-16239-9_3.
- [183] A. Heßeler, C. Hood, C. Missling, R. Stücka und G. Versteegen, *Anforderungsmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [184] *Systems and software engineering - System life cycle processes*, ISO 15288, ISO/IEC/IEEE 15288, 2015.
- [185] *Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen: VDE 0104:2011-10*, 50191, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Okt. 2011.
- [186] S. Kara, P. Pornprasitpol und H. Kaebernick, „Selective Disassembly Sequencing: A Methodology for the Disassembly of End-of-Life Products“, *CIRP Annals*, Jg. 55, Nr. 1, S. 37–40, 2006, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60361-8.
- [187] Z. Zheng, W. Xu, Z. Zhou, D. T. Pham, Y. Qu und J. Zhou, „Dynamic Modeling of Manufacturing Capability for Robotic Disassembly in Remanufacturing“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 10, S. 15–25, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.005>
- [188] H.-J. Kim, *Beitrag zur dynamischen Prozessplanung und Generierung von Steuerungssequenzen für flexible Demontagesysteme*. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2004. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2004.
- [189] S. A. Reveliotis, „Modelling and controlling uncertainty in optimal disassembly planning through reinforcement learning“, *Proceedings 2004 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 2625–2633, 2004. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1307457>
- [190] S. Lawrenz, M. Nippraschk, P. Wallat, A. Rausch, D. Goldmann und A. Lohrengel, „Is it all about Information? The Role of the Information Gap between Stakeholders in the Context of the Circular Economy“, *Procedia CIRP*, Jg. 98, S. 364–369, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.118.
- [191] F. Al-Turjman, Hg., *Edge Computing: From Hype to Reality*. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [192] P. Fischer und P. Hofer, *Lexikon der Informatik*, 15. Aufl. Berlin: Springer, 2011.
- [193] L. Kintscher, S. Lawrenz und H. Poschmann, „A Life Cycle Oriented Data-Driven Architecture for an Advanced Circular Economy“, *Procedia CIRP*, Jg. 98, S. 318–323, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.110.

- [194] H. Poschmann, H. Brüggemann und D. Goldmann, „Robot Cognition in Disassembly: Advanced Information Processing for an Adaptive Dismantling Ecosystem“, *Proc. 12th Int. Conf. on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications (ADAPTIVE2020)*, 978-1-61208-781-8, S. 21–28, 2020.
- [195] S. Lawrenz und A. Rausch, „Don't Buy A Pig In A Poke A Framework for Checking Consumer Requirements In A Data Marketplace“, *Hawaii International Conference on System Sciences*, 2021, doi: 10.24251/HICSS.2021.566.
- [196] C. Scheller *et al.*, „Coordinated Planning in Closed-loop Supply Chains and its Implications on the Production and Recycling of Lithium-ion Batteries“, *Procedia CIRP*, Jg. 98, S. 464–469, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.135.
- [197] G. Yuan, Y. Yang und D. T. Pham, „Multiobjective Ecological Strategy Optimization for Two-Stage Disassembly Line Balancing With Constrained-Resource“, *IEEE Access*, Jg. 8, S. 88745–88758, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994065.
- [198] G. C. de Oliveira Neto, A. de Jesus Cardoso Correia und A. M. Schroeder, „Economic and environmental assessment of recycling and reuse of electronic waste: Multiple case studies in Brazil and Switzerland“, *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 127, S. 42–55, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.011.
- [199] J. R. Peeters, P. Vanegas, W. Dewulf und J. R. Duflou, „Economic and environmental evaluation of design for active disassembly“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 140, S. 1182–1193, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.043.
- [200] S. Aparcana und S. Salhofer, „Development of a social impact assessment methodology for recycling systems in low-income countries“, *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 18, Nr. 5, S. 1106–1115, 2013, doi: 10.1007/s11367-013-0546-8.
- [201] D. Reinales, D. Zambrana-Vasquez und A. Saez-De-Guinoa, „Social Life Cycle Assessment of Product Value Chains Under a Circular Economy Approach: A Case Study in the Plastic Packaging Sector“, *Sustainability*, Jg. 12, Nr. 16, S. 6671, 2020, doi: 10.3390/su12166671.
- [202] E. Cadena, F. Rocca, J. A. Gutierrez und A. Carvalho, „Social life cycle assessment methodology for evaluating production process design: Biorefinery case study“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 238, S. 117718, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117718.
- [203] V. K. Bellmann, S. Brede und P. Nyhuis, „Ergonomiebewertung 4.0“, *ZWF*, Jg. 112, Nr. 9, S. 588–592, 2017, doi: 10.3139/104.111788.
- [204] L. P. Coelho und W. Richert, *Building Machine Learning Systems with Python*, 2. Aufl. Birmingham: Packt Publishing, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=2000929>
- [205] S. Ioffe und C. Szegedy, „Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift“, 11. Feb. 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1502.03167>.
- [206] A. Handl und T. Kuhlenkasper, *Multivariate Analysemethoden: Theorie und Praxis mit R*, 3. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, 2017.
- [207] Y. A. Alamerew, M. L. Kambanou, T. Sakao und D. Brissaud, „A Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies“, *Sustainability*, Jg. 12, Nr. 12, S. 5129, 2020, doi: 10.3390/su12125129.
- [208] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, „Ressourcenschonende Batteriekreisläufe: Mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben“, 2020.
- [209] X. Guo, S. Liu, M. Zhou und G. Tian, „Dual-Objective Program and Scatter Search for the Optimization of Disassembly Sequences Subject to Multiresource Constraints“, *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, Jg. 15, Nr. 3, S. 1091–1103, 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2731981.

- [210] A. ElSayed, E. Kongar und S. M. Gupta, „A Heuristic Approach for Disassembly Sequencing Problem for Robotic Disassembly Operations“ in *Prototyping of robotic systems: Applications of design and implementation*, T. M. Sobh und X. Xiong, Hg., Hershey, Pa: IGI Global (701 E. Chocolate Avenue Hershey Pennsylvania 17033 USA), 2012, S. 438–448. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0176-5.ch015>
- [211] M. Alfaro-Algaba und F. J. Ramirez, „Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing“, *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 154, S. 104461, 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104461.
- [212] C. Scheller, K. Schmidt und T. S. Spengler, „Decentralized master production and recycling scheduling of lithium-ion batteries: a techno-economic optimization model“, *J Bus Econ*, 2020, doi: 10.1007/s11573-020-00999-7.
- [213] Y. Gao, Y. Feng, Q. Wang, H. Zheng und J. Tan, „A multi-objective decision making approach for dealing with uncertainty in EOL product recovery“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 204, S. 712–725, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.080.
- [214] J. Brownlee, „4 Types of Classification Tasks in Machine Learning“, *Machine Learning Mastery*, 7. Apr. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://machinelearningmastery.com/types-of-classification-in-machine-learning/>. Zugriff am: 1. Dezember 2020.
- [215] M. Struß, „Benchmark verschiedener Vorgehensweisen zur Automatisierung von Entscheidungsprozessen“. Masterthesis, Institut für Produktionstechnik, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel, 2020.
- [216] R. Kohavi, „A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection“, *IJCAI'95: Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence*, Nr. 2, S. 1137–1143, 1995. [Online]. Verfügbar unter: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1643031.1643047>
- [217] M. Harvey, „Let’s evolve a neural network with a genetic algorithm—code included“, *Coastline Automation*, 7. Apr. 2017, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://blog.coast.ai/lets-evolve-a-neural-network-with-a-genetic-algorithm-code-included-8809bece164?gi=d71ff3d62737>. Zugriff am: 2. Dezember 2020.
- [218] J. Feng, Y. Yu und Z.-H. Zhou, „Multi-Layered Gradient Boosting Decision Trees“. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1806.00007v1>
- [219] S. Popov, S. Morozov und A. Babenko, „Neural Oblivious Decision Ensembles for Deep Learning on Tabular Data“, 13. Sep. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1909.06312v2>.
- [220] Xavier Glorot, Antoine Bordes und Yoshua Bengio, „Deep Sparse Rectifier Neural Networks“ (en), *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, Nr. 15, S. 315–323, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://proceedings.mlr.press/v15/glorot11a/glorot11a.pdf>
- [221] Ilya Sutskever, James Martens, George Dahl und Geoffrey Hinton, „On the importance of initialization and momentum in deep learning“ (en), *International Conference on Machine Learning*, S. 1139–1147, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://proceedings.mlr.press/v28/sutskever13.html>
- [222] C. E. Shannon, „A Mathematical Theory of Communication“, *Bell System Technical Journal*, Jg. 27, Nr. 3, S. 379–423, 1948, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- [223] J. M. Joyce, „Kullback-Leibler Divergence“ in *Springer reference, International encyclopedia of statistical science*, M. Lovric, Hg., Berlin: Springer, 2011, S. 720–722, doi: 10.1007/978-3-642-04898-2_327.

- [224] G. Tian, M. Zhou und J. Chu, „A Chance Constrained Programming Approach to Determine the Optimal Disassembly Sequence“, *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, Jg. 10, Nr. 4, S. 1004–1013, 2013, doi: 10.1109/TASE.2013.2249663.
- [225] U. Roy und B. Zhu, „A Disassembly Planning Information Model for Disassembly Sequencing Problem“, *Robot Autm Eng J*, Jg. 1, Nr. 3, S. 1–18, 2017, RAEJ.MS.ID.555565.
- [226] A. J. D. Lambert und S. M. Gupta, „Methods for optimum and near optimum disassembly sequencing“, *International Journal of Production Research*, Jg. 46, Nr. 11, S. 2845–2865, 2008, doi: 10.1080/00207540601120484.
- [227] C. Lu, H. Z. Huang, B. Zheng, J. Y. H. Fuh und Y. S. Wong, „An Ant Colony Optimization Approach to Disassembly Planning“ in *2008 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis (ICACIA 2008)*, Chengdu, China, 2008, S. 81–84, doi: 10.1109/ICA-CIA.2008.4769976.
- [228] J. Hromkovič, „Komplexitätstheorie“ in *Lehrbuch, Theoretische Informatik: Formale Sprachen, Berechenbarkeit, Komplexitätstheorie, Algorithmik, Kommunikation und Kryptographie*, J. Hromkovič, Hg., 5 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 167–215, doi: 10.1007/978-3-658-06433-4_6.
- [229] A. J. D. Lambert, „Optimizing disassembly processes subjected to sequence-dependent cost“, *Computers & Operations Research*, Jg. 34, Nr. 2, S. 536–551, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.03.012.
- [230] J. Aleotti und S. Caselli, „Efficient planning of disassembly sequences in physics-based animation“, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 87–93, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=5354486>
- [231] A. ElSayed, E. Kongar, S. M. Gupta und T. M. Sobh, „A Robotic-Driven Disassembly Sequence Generator for End-Of-Life Electronic Products“, *J Intell Robot Syst*, Nr. 68, S. 43–52, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9667-8>
- [232] B. Li, L. Ding, M. Rajai, Di Hu und S. Zheng, „Backtracking Algorithm-based Disassembly Sequence Planning“, *Procedia CIRP*, Jg. 69, S. 932–937, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.007.
- [233] L. S. Homem de Mello und A. C. Sanderson, „AND/OR graph representation of assembly plans“, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Jg. 6, Nr. 2, S. 188–199, 1990, doi: 10.1109/70.54734.
- [234] U. Bükür *et al.*, „Vision-based control of an autonomous disassembly station“, *Robotics and Autonomous Systems*, Nr. 35, S. 179–189, 2001. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/S0921-8890%2801%2900121-X>
- [235] C. Demant, B. Streicher-Abel und A. Springhoff, *Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*, 3. Aufl. Berlin: Springer, 2011.
- [236] T. Hodan *et al.*, „Photorealistic Image Synthesis for Object Instance Detection“, 9. Feb. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1902.03334v1>.
- [237] Aphex34, *typical CNN architecture: Lizenzfreie Abbildung (Creative Commons)*. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Typical_cnn.png (Zugriff am: 26. Oktober 2020).
- [238] H.-C. Shin *et al.*, „Deep Convolutional Neural Networks for Computer-Aided Detection: CNN Architectures, Dataset Characteristics and Transfer Learning“ (eng), *IEEE transactions on medical imaging*, Jg. 35, Nr. 5, S. 1285–1298, 2016, doi: 10.1109/TMI.2016.2528162.
- [239] T.-Y. Lin *et al.*, „Microsoft COCO: Common Objects in Context“, 1. Mai 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1405.0312>.

- [240] J. Huang *et al.*, „Speed/Accuracy Trade-Offs for Modern Convolutional Object Detectors“ in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, 2017, S. 3296–3297, doi: 10.1109/CVPR.2017.351.
- [241] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell und J. Malik, „Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1311.2524v5>. Zugriff am: 20. Oktober 2020.
- [242] R. Girshick, „Fast R-CNN“ in *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Santiago, Chile, 07.12.2015 - 13.12.2015, S. 1440–1448, doi: 10.1109/ICCV.2015.169.
- [243] S. Ren, K. He, R. Girshick und J. Sun, „Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks“ (eng), *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Jg. 39, Nr. 6, S. 1137–1149, 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [244] K. He, X. Zhang, S. Ren und J. Sun, „Deep Residual Learning for Image Recognition“ in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, S. 770–778, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [245] Z. Zhang, Y. Wang, J. Zhang und X. Mu, „Comparison of multiple feature extractors on Faster RCNN for breast tumor detection“ in *2019 8th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE)*, Zhengzhou, China, 2019, S. 1–4, doi: 10.1109/ISNE.2019.8896490.
- [246] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens und Q. Le V, „Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition“, 21. Juli 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1707.07012v4>.
- [247] C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke und A. A. Alemi, „Inception-v4, inception-ResNet and the impact of residual connections on learning“ in *Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*, S. Singh und S. Markovitch, Hg., San Francisco, California, USA: AAAI Press, 2017, S. 4278–4284, doi: 10.5555/3298023.3298188.
- [248] V. Dumoulin und F. Visin, „A guide to convolution arithmetic for deep learning“, 23. März 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1603.07285v2>.
- [249] K. Sarkar, K. Varanasi und D. Stricker, „Trained 3D Models for CNN based Object Recognition“ in *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Porto, Portugal, 27.02.2017 - 01.03.2017, S. 130–137, doi: 10.5220/0006272901300137.
- [250] C. Shorten und T. M. Khoshgoftaar, „A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning“, *J Big Data*, Jg. 6, Nr. 1, 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0197-0.
- [251] A. O’Riordan, T. Newe, G. Dooly und D. Toal, „Stereo Vision Sensing: Review of existing systems“ in *2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST)*, Limerick, 04.12.2018 - 06.12.2018, S. 178–184, doi: 10.1109/ICSensT.2018.8603605.
- [252] Y. M. Wang, Y. Li und J. B. Zheng, „A camera calibration technique based on OpenCV“ in *2010 3rd International Conference on Information Sciences and Interaction Sciences (ICIS)*, Chengdu, China, 23.06.2010 - 25.06.2010, S. 403–406, doi: 10.1109/ICICIS.2010.5534797.
- [253] I. Ali, O. Suominen, A. Gotchev und E. R. Morales, „Methods for Simultaneous Robot-World-Hand-Eye Calibration: A Comparative Study“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 19, Nr. 12, 2019, doi: 10.3390/s19122837.
- [254] N. Albrecht und N. Bauer, Hg., *Leitfaden zur Industriellen Bildverarbeitung*, 2. Aufl. Erlangen: Fraunhofer-Allianz Vision, 2001. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.vision.fraunhofer.de/de/publikationen/leitfaeden/band-1.html>
- [255] K. Spinnler, *Leitfaden zur industriellen Bildverarbeitung*. Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2012.
- [256] K. Schiebold, *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Sichtprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

- [257] K. Mao, D. Lu, D. E und Z. Tan, „A Case Study on Attribute Recognition of Heated Metal Mark Image Using Deep Convolutional Neural Networks“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 18, Nr. 6, 2018, doi: 10.3390/s18061871.
- [258] L. Song, X. Li, Y. Yang, X. Zhu, Q. Guo und H. Yang, „Detection of Micro-Defects on Metal Screw Surfaces Based on Deep Convolutional Neural Networks“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 18, Nr. 11, 2018, doi: 10.3390/s18113709.
- [259] L. Petricca, T. Moss, G. Figueroa und S. Broen, „Corrosion Detection Using A.I : A Comparison of Standard Computer Vision Techniques and Deep Learning Model“ in *The Sixth International Conference on Computer Science, Engineering and Information Technology*, 05212016, S. 91–99, doi: 10.5121/csit.2016.60608.
- [260] *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter*, ISO/TS 15066, ISO/TS 15066, 2017.
- [261] L. Mauro *et al.*, „Visual search and recognition for robot task execution and monitoring“, 2018, doi: 10.3233/978-1-61499-929-4-94.
- [262] F. Puja, S. Grazioso, A. Tammara, V. Ntouskos, M. Sanzari und F. Pirri, „Vision-based deep execution monitoring“, 29. Sep. 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1709.10507v1>.
- [263] D. Park, Z. Erickson, T. Bhattacharjee und C. C. Kemp, „Multimodal execution monitoring for anomaly detection during robot manipulation“ in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 2016, S. 407–414, doi: 10.1109/ICRA.2016.7487160.
- [264] *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010); Deutsche Fassung EN ISO 12100:2010*, 12100, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Mrz. 2011.
- [265] Y. Wu, A. Kirilov, F. Massa, W.-Y. Lo und R. Girshick, *Detectron 2*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/facebookresearch/detectron2> (Zugriff am: 23. Juli 2020).
- [266] Z. Cao, G. Hidalgo Martinez, T. Simon, S.-E. Wei und Y. A. Sheikh, „OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields“ (eng), *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2019, doi: 10.1109/TPAMI.2019.2929257.
- [267] T. Simon, H. Joo, I. Matthews und Y. Sheikh, „Hand Keypoint Detection in Single Images Using Multiview Bootstrapping“ in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, 2017, S. 4645–4653, doi: 10.1109/CVPR.2017.494.
- [268] S. Lee, S. Kwak und M. Cho, „Universal Bounding Box Regression and Its Applications“ in *LNCS sublibrary, 11361-11366, Computer Vision - ACCV 2018: 14th Asian Conference on Computer Vision, Perth, Australia, December 2-6, 2018 : revised selected papers*, K. Schindler, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 373–387, doi: 10.1007/978-3-030-20876-9_24.
- [269] P. L. Liu, „Self-supervised Keypoint Learning — A Review - Towards Data Science“, *Towards Data Science*, 16. März 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://towardsdatascience.com/self-supervised-keypoint-learning-aade18081fc3>. Zugriff am: 9. November 2020.
- [270] H. Dai *et al.*, „Joint COCO and Mapillary Workshop at ICCV 2019 Keypoint Detection Challenge Track Technical Report: Distribution-Aware Coordinate Representation for Human Pose Estimation“, 13. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2003.07232v1>.
- [271] *DIN EN ISO 13849-1:2016-06, Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2015*, 13849, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Jun. 2016.
- [272] H. F. Bender, *Gefahrstoffe: Das Praxishandbuch für das Umgangs- und Umweltrecht*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer, 2020.

- [273] M. Husty, A. Karger, H. Sachs und W. Steinhilper, *Kinematik und Robotik*. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [274] S. Sundaram, I. Remmler und N. M. Amato, „Disassembly Sequencing Using a Motion Planning Approach“, *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, 2001, 1050-4729.
- [275] I. Aguinaga, D. Borro und L. M. Matey, „Parallel RRT-based path planning for selective disassembly planning“, *Int J Adv Manuf Technol*, Nr. 36, S. 1221–1233, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0930-2>
- [276] I. Aguinaga, D. Borro und L. M. Matey, „Path-planning techniques for the simulation of disassembly tasks“, *Assembly Automatico*, Jg. 27, S. 207–214, 2007.
- [277] F. Peng und Y. Zhao, „Triangle Sampling Path Planning in Environment with Danger Zones for Assembly/Disassembly“, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, Nr. 88, S. 167–173, 2011, 1b/2012.
- [278] D. Schneider, E. Schömer und N. Wolpert, „A motion planning algorithm for the invalid initial state disassembly problem“, *Proceedings of the 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, S. 35–41, 2015, Art. no. 15505348. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7283702>
- [279] S. Murray, W. Floyd-Jones, Y. Qi, D. Sorin und G. Konidaris, „Robot Motion Planning on a Chip“ in *Robotics: Science and Systems 2016*, June 18-22, 2016, doi: 10.15607/RSS.2016.XII.004.
- [280] J. Borràs, R. Heudorfer, S. Rader, P. Kaiser und T. Asfour, „The KIT Swiss Knife Gripper for Disassembly Tasks: A Multi-Functional Gripper for Bimanual Manipulation with a Single Arm“ in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, 2018, S. 4589–4597, doi: 10.1109/IROS.2018.8593567.
- [281] M. Nave und R. Jünemann, *Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen*. Dissertation, 1. Aufl. Dortmund: Praxiswissen GmbH Gesellschaft für innovative Qualifizierung, 2003.
- [282] R. Li *et al.*, „Unfastening of Hexagonal Headed Screws by a Collaborative Robot“, *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, S. 1–14, 2020, doi: 10.1109/TASE.2019.2958712.
- [283] D. Mironov, M. Altamirano, H. Zabihiyar, A. Liviniuk, V. Liviniuk und D. Tsetserukou, „Haptics of Screwing and Unscrewing for Its Application in Smart Factories for Disassembly“, *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, S. 428–439, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1801.10386.pdf>
- [284] P. Schumacher und M. Jouaneh, „A system for automated disassembly of snap-fit covers“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 69, 9-12, S. 2055–2069, 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5174-8.
- [285] D. W. Apley, G. Seliger, L. Voit und J. Shi, „Diagnostics in Disassembly Unscrewing Operations“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Jg. 10, Nr. 2, S. 111–128, 1998, doi: 10.1023/A:1008089230047.
- [286] J. Schmitt, H. Haupt, M. Kurrat und A. Raatz, „Disassembly Automation for Lithium-Ion Battery Systems Using a Flexible Gripper“, Tallinn, Estland, 2011. [Online]. Verfügbar unter: 10.1109/ICAR.2011.6088599.
- [287] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte*, 9241-11, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2018.
- [288] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*, 9241-210, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Jan. 2011.

- [289] *Ergonomie der Mensch-System Interaktion: Entwurf - Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Interaktionsprinzipien*, 9241-110, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2019.
- [290] E. Lotter und U. Müller, „Moderne/smarte Montagearbeitsplätze im Umfeld der Industrie 4.0“ in *Industrie 4.0 für die Praxis: Mit realen Fallbeispielen aus mittelständischen Unternehmen und vielen umsetzbaren Tipps*, R. M. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2018, S. 93–113, doi: 10.1007/978-3-658-21118-9_7.
- [291] *Smart manufacturing - Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0)*, 63088:2017, British Standards Institution.
- [292] OPC Foundation, *OPC Unified Architecture. Part 1 : Overview and Concepts: Release 1.04*. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-1-overview-and-concepts/> (Zugriff am: 23. Juli 2020).
- [293] G. C. Hillar, *MQTT essentials: A lightweight IoT protocol : the preferred IoT publish-subscribe lightweight messaging protocol*. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://proquest.tech.safaribooksonline.de/9781787287815>
- [294] Open Robotics, *ROS.org | About ROS: Open Source: Creative Commons Attribution 3.0*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ros.org/about-ros/> (Zugriff am: 11. Dezember 2020).
- [295] S. Profanter, A. Tekat, K. Dorofeev, M. Rickert und A. Knoll, „OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance Evaluation of Industry 4.0 Protocols“ in *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Melbourne, Australia, 2019, S. 955–962, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755050.
- [296] G. Bengel, *Grundkurs Verteilte Systeme: Grundlagen und Praxis des Client-Server und Distributed Computing*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [297] C. Anton-Haro und M. Dohler, *Machine-to-machine (M2M) Communications*. Elsevier, 2015.
- [298] J.-D. Decotignie, „Ethernet-Based Real-Time and Industrial Communications“, *Proc. IEEE*, Jg. 93, Nr. 6, S. 1102–1117, 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.849721.
- [299] *OPC UA Companion Specification für Robotik (OPC Robotik) - Teil 1: Vertikale Integration*, 40010-1:2019-07, VDMA 40010-1:2019-07, Frankfurt/Main. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/26810016>
- [300] W. Mahnke, S.-H. Leitner und M. Damm, *OPC unified architecture*. Berlin: Springer, 2009.
- [301] OPC Foundation, *OPC Unified Architecture. Part 3: Address Space Model: Release 1.04*. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-3-address-space-model/> (Zugriff am: 14. Dezember 2020).
- [302] OPC Foundation, *OPC Unified Architecture. Part 5: Information Model: Release 1.04*. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-5-information-model/> (Zugriff am: 14. Dezember 2020).
- [303] R. Gumzej und W. A. Halang, *Real-time systems' quality of service: Introducing quality of service considerations in the life-cycle of real-time systems*. London: Springer, 2010.
- [304] M. Fojcik, R. Cupek, A. Ziebinski, O. Sande und M. K. Fojcik, „Quality of Service in Real-Time OPC UA Applications“ in *LNCS sublibrary. SL 7 - Artificial intelligence*, Bd. 11683, *Computational collective intelligence: 11th international conference, ICCCI 2019, Hendaye, France, September 4-6, 2019 : proceedings*, N. T. Nguyen, R. Chbeir, E. J. Exposito Garcia, P. Anioté und B. Trawiński, Hg., Cham: Springer, 2019, S. 239–248, doi: 10.1007/978-3-030-28374-2_21.
- [305] H. Poschmann, H. Brüggemann und D. Goldmann, „Fostering End-of-Life Utilization by Information-driven Robotic Disassembly“, *Procedia CIRP*, Jg. 98, S. 282–287, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.104.

- [306] International Energy Agency IEA, *Global EV Outlook 2020*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (Zugriff am: 29. Januar 2021).
- [307] T. Elwert, F. Römer und K. Schneider, „Recycling of batteries from electric vehicles“ in *Green Energy and Technology, Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety, and Cost*, G. Pistoia und B. Y. Liaw, Hg., Basel: Springer International Publishing, 2018, S. 289–321.
- [308] Casals, Rodríguez, Corchero und Carrillo, „Evaluation of the End-of-Life of Electric Vehicle Batteries According to the State-of-Health“, *WEVJ*, Jg. 10, Nr. 4, S. 63, 2019, doi: 10.3390/wevj10040063.
- [309] After Sales Qualifizierung, „Der e-up!: Selbststudienprogramm 527“, Wolfsburg 000.2812.84.00, Dez. 2013.
- [310] N. Natkunarajah, „Automatisierte Demontage von Lithium-Ionen-Batterien: Ein wichtiger Beitrag zur Rohstoffrückgewinnung“ in *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen: 3. Symposium, 05./06. Februar 2014, Neues Museum Nürnberg*, U. Teipel und A. Reller, Hg., Stuttgart: Fraunhofer Verl., 2014, S. 475–491.
- [311] Nvidia Corp., Hg., „NVIDIA Jetson AGX Xavier Series System-on-Module: Volta GPU + Carmel CPU + 8/32GB LPDDR4x + 32GB eMMC“. Data Sheet, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://developer.nvidia.com/jetson-agx-xavier-series-datasheet>. Zugriff am: 16. Februar 2021.
- [312] J. Diekmann *et al.*, „Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes“, *J. Electrochem. Soc.*, Jg. 164, Nr. 1, A6184-A6191, 2017, doi: 10.1149/2.0271701jes.
- [313] A. Kwade, T. S. Spengler, C. Herrmann, S. Scholl und M. Kurrat, „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec II: Abschlussberichte der beteiligten Verbundpartner“, Braunschweig, 2017.
- [314] M. Abadi *et al.*, „TensorFlow Whitepaper: Large-scale machine learning on heterogeneous systems“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [tensorflow.org](https://www.tensorflow.org).
- [315] KUKA Roboter GmbH, Hg., „LBR iiwa: LBR iiwa 7 R800, LBR iiwa 14 R820 - Spezifikation“, Augsburg, 28. Apr. 2016.
- [316] KUKA Roboter GmbH, Hg., „KUKA Sunrise.OS 1.14 / KUKA Sunrise.Workbench 1.14: Bedien- und Programmieranleitung für Systemintegratoren“, Augsburg, 20. Juli 2017.
- [317] K. Siebertz, D. van Bebber und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [318] T. Sarkar, *Design-of-experiment (DOE) matrix generator for engineering and statistics: MIT License*. [Online]. Verfügbar unter: <https://tirthajyoti.github.io/DOE/DOE.html> (Zugriff am: 1. März 2021).
- [319] R: *A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.R-project.org/>
- [320] E. Yildiz und F. Wörgötter, „DCNN-based Screw Classification in Automated Disassembly Processes“ in *International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems*, Budapest, Hungary, 11/4/2020 - 11/6/2020, S. 61–68, doi: 10.5220/0009979900610068.
- [321] M. Weyrich und N. Natkunarajah, *Konzeption einer automatischen Demontageanlage für Lithium-Ionen-Batterien*. Baden Baden, 2013.
- [322] N. Niese, C. Pieper, A. Arora und A. Xie, „The Case for a Circular Economy in Electric Vehicle Batteries“, 14. Sep. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bcg.com/de-de/publications/2020/case-for-circular-economy-in-electric-vehicle-batteries>. Zugriff am: 11. April 2021.
- [323] A. Yang, M. Song und Q. Zhan, „A Remanufacturing Closed-Loop Supply Chain Model Considering Disassembly During New Product Design Stage“ in *2018 15th International Conference*

- on Service Systems and Service Management (ICSSSM), Hangzhou, China, 2018, S. 1–4, doi: 10.1109/ICSSSM.2018.8465051.
- [324] Y. A. Alamerew und D. Brissaud, „Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 254, S. 120025, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120025.
- [325] P. Greschke, *Matrix-Produktion: Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung*, 1. Aufl. Norderstedt: BoD - Books on Demand, 2020.
- [326] B. Kalayci und S. M. Gupta, „TABU SEARCH FOR DISASSEMBLY LINE BALANCING WITH MULTIPLE OBJECTIVES“, *41ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS AND INDUSTRIAL ENGINEERING*, 2011.
- [327] S. M. McGovern und S. M. Gupta, „A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing“, *European Journal of Operational Research*, Nr. 179, S. 692–708, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.055>
- [328] NVIDIA Developer, *NVIDIA Isaac SDK*. [Online]. Verfügbar unter: <https://developer.nvidia.com/isaac-sdk> (Zugriff am: 4. April 2021).
- [329] J. Aleotti und S. Caselli, „Physics-based virtual reality for task learning and intelligent disassembly planning“, *Virtual Reality*, Jg. 15, S. 41–54, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10055-009-0145-y>
- [330] S. Takeuchi und K. Saitou, „Design for product embedded disassembly sequence“, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences*, 2005, DETC2005-85260. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1511448>
- [331] M. Tan, R. Pang und Q. Le V, „EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1911.09070v7>
- [332] NVIDIA Developer, *NVIDIA Jarvis*. [Online]. Verfügbar unter: <https://developer.nvidia.com/nvidia-jarvis> (Zugriff am: 29. März 2021).
- [333] A. Ruhela, S. Xu, K. V. Manian, H. Subramoni und D. K. Panda, „Analyzing and Understanding the Impact of Interconnect Performance on HPC, Big Data, and Deep Learning Applications: A Case Study with InfiniBand EDR and HDR“ in *2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, New Orleans, LA, USA, 2020, S. 869–878, doi: 10.1109/IPDPSW50202.2020.00147.
- [334] L. Yuan, J. Cui, X. Zhang und J. Liu, „Framework and Enabling Technologies of Cloud Robotic Disassembly“, *Procedia Computer Science*, Jg. 176, S. 3673–3681, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.09.019.
- [335] M. Hofmann und G. Walker, *Volkswagen Industrial Cloud*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/03/volkswagen-industrial-cloud.html#> (Zugriff am: 29. März 2021).
- [336] A. ElSayed, E. Kongar und S. M. Gupta, „An Evolutionary Algorithm for Selective Disassembly of End-of-Life Products“, *International Journal of Swarm Intelligence and Evolutionary Computation*, Jg. 1, 2012, Z110601.
- [337] G. Percoco und M. Diella, „Preliminary Evaluation of Artificial Bee Colony Algorithm When Applied to Multi Objective Partial Disassembly Planning“, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Jg. 6, Nr. 17, S. 3234–3243, 2013.
- [338] M. Dusseldorp, „Technikfolgenabschätzung zwischen Neutralität und Bewertung“, *Aus Politik und Zeitgeschichte*, Jg. 64, 6-7/2014, S. 25–30, 3. Feb. 2014.
- [339] H. Jonas, *Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation*, 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2012.

- [340] C. Berg, *Ist Nachhaltigkeit utopisch?: Wie wir Barrieren überwinden und zukunftsfähig handeln*. München: oekom verlag, 2020.
- [341] N. Elkmann, „Fragenkatalog für das Fachgespräch zum Thema „Auswirkungen der Robotik auf Arbeit, Wirtschaft und Gesellschaft“ des Ausschusses Digitale Agenda am 22. Juni 2016: Ausschuss Digitale Agenda“, Berlin, Ausschussdrucksache 18(24)103.
- [342] Wissenschaftliche Dienste, „Wirtschaftliche Aspekte von Robotik und Plattformökonomie: Dokumentation“, Berlin WD5-3000-115/18, 23. Aug. 2018.
- [343] Enquete-Kommission Künstliche Intelligenz, „Künstliche Intelligenz – Gesellschaftliche Verantwortung und wirtschaftliche, soziale und ökologische Potenziale: Literatúrauswahl“, Berlin, Aktuelle Bibliografien der Bibliothek 18, 30. Sep. 2018.
- [344] J. Buolamwini, *When the Robot Doesn't See Dark Skin – MIT Media Lab*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.media.mit.edu/articles/when-the-robot/> (Zugriff am: 30. März 2021).
- [345] Enquete-Kommission Künstliche Intelligenz, „Unterrichtung der Enquete-Kommission Künstliche Intelligenz – Gesellschaftliche Verantwortung und wirtschaftliche, soziale und ökologische Potenziale“, Berlin, Drucksache 19/23700, 28. Okt. 2020.